

Adsorben dari Lumpur Limbah untuk Penyisihan Kromium pada *Fixed Bed Column*

Anggrika Riyanti*, Hadrah, Monik Kasman, Marhadi, Samuel

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Batanghari

*Correspondence: anggrika.riyanti@unbari.ac.id

Abstrak. Lumpur limbah merupakan produk sampingan utama dari proses pengolahan biologis air limbah. Instalasi Pengolahan Air Limbah pada Pabrik Kelapa Sawit (PKS) memproduksi lumpur limbah dengan jumlah yang cukup banyak dan hingga saat ini belum dimanfaatkan secara optimal. Pada penelitian ini bertujuan mengkaji potensi lumpur limbah PKS sebagai adsorben untuk penyisihan logam kromium (Cr) dengan metode *fixed bed column*. Pada penelitian ini juga akan menganalisis pengaruh resirkulasi terhadap penurunan kadar krom. Lumpur dikarbonisasi dengan furnace pada suhu 300°C selama 2 jam. Limbah sintesis kromium dibuat pada tiga konsentrasi yaitu 2000 ppm, 3000 ppm, dan 4000 ppm. Adsorben lumpur yang digunakan sebanyak 100 gram yang diisi ke dalam *fix bed column*. Resirkulasi air limbah dilakukan sebanyak 3 kali. Isoterm adsorpsi dianalisis menggunakan model Langmuir dan Freundlich. Hasil penelitian menunjukkan penyisihan terbaik tanpa resirkulasi terjadi pada konsentrasi kromium 3000 ppm dengan efisiensi penyisihan sebesar 48,07%. Selanjutnya dilakukan resirkulasi sebanyak 3 kali dan menghasilkan nilai penyisihan bervariasi pada resirkulasi ke-1, 2, dan 3 sebesar 37,9%, 40,06% dan 35,4%. Penyisihan tertinggi terjadi pada resirkulasi kedua. Penambahan resirkulasi menyebabkan penurunan penyerapan logam krom karena adsorben telah mencapai titik jenuh. Hal ini memungkinkan lepasnya ion kromium yang telah terjerap dan menyebabkan efisiensi penyisihan menurun. Model isoterm adsorpsi untuk adsorben lumpur yang cocok adalah model Langmuir, dimana proses adsorpsi terjadi dalam single layer dan bersifat homogen.

Kata kunci: Lumpur limbah, adsorpsi, kromium, *fixed bed column*.

Abstract. Sewage sludge is a major by-product of the wastewater biological treatment process. Wastewater Treatment Plants at Palm Oil Mills (PKS) produce a lot of sewage sludge and until now it has not been optimally utilized. This study aims to examine the potential of PKS sewage sludge as an adsorbent for the removal of kromium (Cr) by the *fixed bed column* method. The study will also analyze the effect of recirculation on the reduction of kromium levels. The sludge was carbonized in a furnace at 300°C for 2 hours. Synthetic kromium wastewater was made at three concentrations of 2000 ppm, 3000 ppm, and 4000 ppm. The sludge adsorbent used was 100 grams which was filled into the *fix bed column*. Recirculation of kromium wastewater was performed 3 times. Adsorption isotherms were analyzed using Langmuir and Freundlich models. The results showed that the best removal without recirculation occurred at a kromium concentration of 3000 ppm with a removal efficiency of 48.07%. Furthermore, recirculation was carried out 3 times and resulted in varying removal values at the 1st, 2nd, and 3rd recirculation of 37.9%, 40.06% and 35.4%. The highest removal occurred in the second recirculation. The addition of recirculation led to a decrease in the sorption of chrome as the adsorbent had reached saturation point. This allows the release of kromium ions that have been adsorbed and causes the removal efficiency to decrease. A suitable adsorption isotherm model for sludge adsorbent is the Langmuir model, where the adsorption process occurs in a single layer and is homogeneous.

Keywords: sewage sludge, adsorption, kromium, *fixed bed column*.

PENDAHULUAN

Limbah cair kromium (Cr) umumnya terdapat pada limbah industri tekstil, limbah industri penyamakan kulit dan limbah tambang emas. Kromium (Cr) dapat masuk ke badan perairan dengan dua cara, seperti erosi atau pengikisan pada batuan mineral dan debu-debu atau partikel Cr yang ada di udara akan dibawa turun oleh air. Masuknya Cr secara non alamiah diduga lebih banyak diakibatkan aktifitas manusia seperti buangan limbah industri dan

rumah tangga ke badan air (Andini, 2017). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 menyatakan bahwa kadar maksimum Cr (VI) untuk keperluan air baku air minum sebesar 0,05 mg/L dan air untuk pertanian sebesar 1 mg/L.

Berbagai metode telah dilakukan untuk menyisihkan logam berat dari air limbah. Salah satu metode yang banyak digunakan dan mempunyai efektivitas tinggi untuk penyisihan logam berat adalah adsorpsi. Adsorben yang

digunakan harus mempunyai large surface are and high adsorption capacity (Bukarov at. al. 2018; Kuroki et al, 2019). Bahan baku adsorben dapat berasal dari berbagai bahan hingga limbah seperti limbah pertanian, produk sampingan industri dan limbah rumah tangga. Lumpur limbah kegiatan industri merupakan produk sampingan dari proses pengolahan air limbah secara biologi. Pemanfaatan lumpur limbah dari pengolahan air limbah industri dapat menjadi alternatif sebagai bahan baku adsorben yang low cost, ramah lingkungan and available in quantity (Wang et al., 2019). Adsorben lumpur limbah mampu mencapai penyerapan zat warna dan ion logam yang tinggi karena kapasitas pertukaran kation yang tinggi. Adsorben lumpur limbah meningkatkan penyisihan kromium heksavalen beracun menjadi kromium trivalen yang kurang beracun di dalam air (Gong et al., 2013). Selain itu, perlakuan termal secara signifikan menstabilkan logam berat yang terkandung dalam lumpur (Xu et al., 2015).

Pabrik Kelapa Sawit merupakan industri yang cukup berkembang di Indonesia dimana pengolahan air limbahnya dilakukan pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPAL). IPAL pada PKS ini menghasilkan lumpur limbah dalam jumlah besar. Lumpur limbah yang dihasilkan berasal dari kolam anaerobic dan mengandung unsur hara antara lain total nitrogen, Fosfat, Kalium, Magnesium, dan Kalsium (Regkouzas, 2019). Pemanfaatan lumpur PKS ini saat ini belum optimal, terbatas pada aplikasi lahan yaitu sebagai pupuk pada lahan perkebunan sawit. Pemanfaatan lumpur PKS sebagai adsorben diharapkan mempunyai potensi yang besar untuk menyisihkan logam berat dalam air limbah termasuk kromium. Penelitian ini bertujuan mengkaji efektivitas adsorben lumpur limbah PKS dalam penyisihan kromium dalam air limbah dengan metode fixed bed column. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh resirkulasi air limbah terhadap efisiensi penyisihan kromium.

METODE

Preparasi Adsorben dan Larutan Kromium

Material lumpur pabrik kelapa sawit yang digunakan pada studi ini dikumpulkan dari kolam anaerobic pada Instalasi Pengolahan Air Limbah (IPA). Lumpur dijemur di bawah sinar matahari untuk mengurangi kadar air, kemudian dikeringkan pada oven di laboratorium pada suhu 105°C selama 48 jam. Selanjutnya lumpur limbah dikarbonisasi dengan menggunakan

furnace pada suhu 300°C selama 2 jam. Adsorbent hasil karbonisasi didinginkan pada desikator. Adsorben lumpur kemudian disaring dan diayak dengan ayakan 60 mesh sehingga didapatkan partikel lumpur dengan ukuran < 250 µm. Adsorben lumpur yang telah dingin disimpan di dalam container kedap udara.

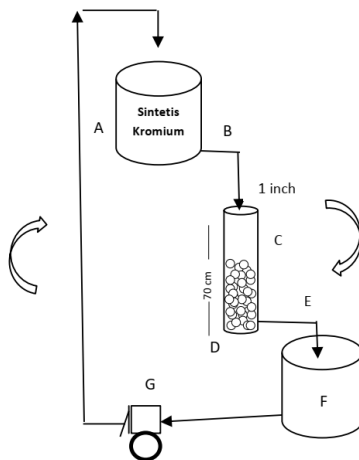
Larutan sintesis Cr(VI) dibuat pada 3 konsentrasi yaitu 1000 ppm, 2000 ppm, 3000 ppm. Larutan Cr(VI) dibuat dengan melarutkan bubuk $K_2Cr_2O_7$ masing-masing sebanyak 2.83 gram, 4.24 gram, dan 5.65 gram ke dalam 500 ml aquades pada labu ukur 500 ml sehingga didapatkan konsentrasi tersebut. Karakterisasi adsorben lumpur dilakukan dengan menghitung kadar air, kadar abu dan kadar volatil berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 06-3730-1995).

1. Pengujian kadar air dilakukan dengan mengeringkan sebanyak 1 gram adsorben lumpur ke dalam oven pada suhu 105°C selama 2 jam. Kemudian didinginkan pada desikator selama 15 menit dan ditimbang beratnya. Kadar air dihitung berdasarkan selisih persentase total dengan jumlah persentase kadar air.
2. Pengujian kadar abu dilakukan dengan memasukkan 1 gram adsorben ke dalam oven pada suhu 500°C selama 2 jam. Kemudian didinginkan pada desikator dan ditimbang beratnya. Kadar abu dihitung berdasarkan selisih persentase berat adsorben awal dan akhir.
3. Pengujian kadar volatil dilakukan dengan memasukkan 1 gram adsorben ke dalam oven pada suhu 700°C selama 7 menit. Kemudian didinginkan pada desikator dan ditimbang beratnya. Kadar volatil dihitung berdasarkan selisih persentase berat adsorben awal dan akhir.

Eksperimen dengan Fix Bed Column

Reaktor fix bed column dibuat menggunakan pipa berdiameter 1 inch dengan tinggi 70 cm. Bak penampung disusun sebelum dan setelah reaktor. Desain reaktor ditampilkan pada Gambar 1. Selanjutnya adsorben lumpur dimasukkan ke dalam reaktor sebanyak 100 gram. Kemudian air limbah Cr(VI) dialirkan ke dalam reaktor dan air effluent ditampung pada bak penampung untuk kemudian dianalisis konsentrasinya. Hasil penyisihan kromium yang tertinggi dari ketiga variasi akan dilanjutkan untuk pengujian pengaruh resirkulasi terhadap penyisihan kromium. Resirkulasi dilakukan

sebanyak 3 kali dan konsentrasi kromium hasil resirkulasi dianalisis di laboratorium.



Sumber: data olahan

Gambar 1
Fix bed column design

Analisis Efektivitas Penyisihan dan Isotherm Model

Efektivitas adsorpsi menyatakan tingkat besarnya adsorben mampu menyerap polutan. Efektivitas adsorpsi dapat dihitung melalui efisiensi penyisihan (R , %) Cr(VI) dan kapasitas adsorpsi (q_e , mg/g) dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut: (Rajabi et al., 2016; Gupta et al., 2017).

$$R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100$$

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e)}{m} \times V$$

Dimana: C_0 (mg/L) adalah konsentrasi awal and C_e (mg/L) konsentrasi akhir setelah proses adsorpsi pada fix bed column. m adalah massa atau dosis adsorben (g) dan V adalah volume larutan (L).

Pengujian adsorpsi isotherm dilakukan untuk mengetahui bentuk penyerapan Cr(VI) oleh adsorben lumpur PKS. Isotherm adsorpsi digunakan untuk menggambarkan bagaimana zat terlarut berinteraksi dengan adsorben. Pengujian adsorpsi menggunakan dua model isotherm, yaitu model Langmuir dan Freundlich yang dituliskan dengan persamaan berikut (Gupta et al., 2017). Model Freundlich dan Langmuir dijelaskan pada sebagai berikut:

$$Q_e = K_f C_e^{1/n} \quad (3)$$

$$\log Q_e = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (4)$$

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_0} + \left(\frac{1}{Q_0 K_L}\right) \frac{1}{C_e} \quad (5)$$

Dimana: Q_e adalah jumlah kesetimbangan adsorbat dalam fase padat (mg/g), Q_0 adalah maksimum kapasitas adsorpsi (mg/g), K_L adalah konstanta Langmuir, dan K_f dan n adalah konstanta Freundlich masing-masing terkait kapasitas adsorpsi dan intensitas adsorpsi adsorben.

HASIL

Adsorben Lumpur Pada Penyisihan Kromium

Karakteristik adsorben lumpur berdasarkan SNI 06-3730-1995 yaitu kelembaban, kadar abu dan kadar volatil yang ditampilkan pada Tabel 1. Hasil menunjukkan bahwa semua nilai berada di bawah batas maksimum yang ditentukan. Hasil pengujian penyisihan kromium dengan reaktor fix bed column tanpa resirkulasi menunjukkan hasil penyisihan yang cukup baik dapat dilihat pada Tabel 2. Adsorben lumpur dapat menyerap Cr(VI) secara optimum pada konsentrasi 3000 mg/l dengan massa 100 gram dengan efisiensi penyisihan mencapai 48.07%.

Tabel 1
Karakteristik adsorben lumpur

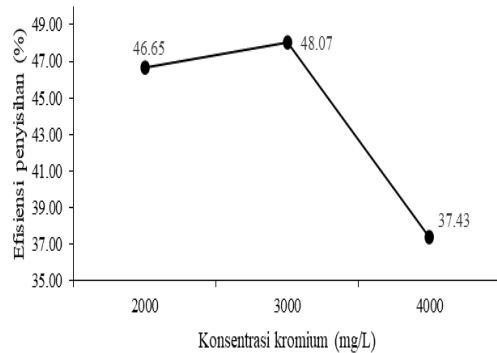
Content	Hasil (%)	SNI 06-3730-1995 (%)
Kelembaban	0.69	Max 15
Kadar Abu	0.42	Max 10
Kadar Volatil	0.83	Max 25

Sumber: data olahan

Tabel 2
Efisiensi penyisihan dan kapasitas adsorpsi

Massa Adsorben (g)	Concentration Awal Cr(VI) (mg/L)	Concentration Akhir Cr(VI) (mg/L)	Efisiensi Penyisihan (%)	Kapasitas Adsorpsi (mg/g)
100	2000	1067	46.65%	4.665
100	3000	1558	48.07%	2.884
100	4000	2503	37.43%	2.994

Sumber: data olahan



Sumber: data olahan

Gambar 2
Efisiensi penyisihan kromium

Gambar 2. menunjukkan peningkatan penyisihan dari 46.65% pada konsentrasi 2000 mg/L menjadi 48.07% pada konsentrasi 3000 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa massa adsorben 100 g masih mampu menyisihkan kromium hingga konsentrasi 3000 mg/L. Namun efisiensi penyisihan mengalami penurunan menjadi 37.43% pada peningkatan konsentrasi kromium 4000 mg/L. Ini menunjukkan bahwa massa adsorben 100 g tidak optimum dalam menurunkan kadar kromium yang lebih tinggi.

Konsentrasi polutan yang lebih tinggi membutuhkan massa adsorben yang lebih besar pula. Sementara kapasitas adsorpsi terbesar dicapai pada konsentrasi 2000 mg/L dengan nilai 4.665 mg/g. Pada dosis yang tinggi kapasitas adsorpsi akan semakin rendah. Hal ini dimungkinkan akibat adanya interferensi (gangguan) antara ruang pengikatan akibat penggumpalan adsorben. Peningkatan kapasitas adsorpsi berbanding terbalik dengan jumlah adsorben yang digunakan, karena kapasitas adsorpsi mengukur banyaknya ion logam yang diserap pada setiap unit berat adsorben.

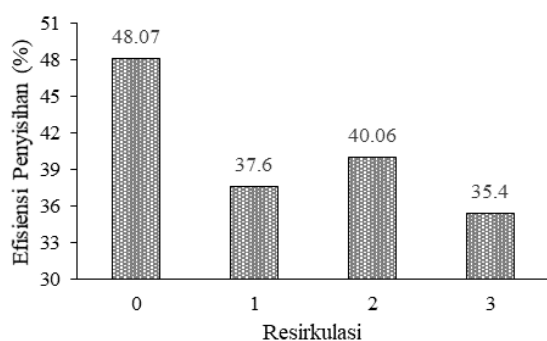
Efek Resirkulasi Terhadap Penyisihan Kromium

Pengujian dengan resirkulasi dilakukan pada variasi yang menghasilkan efisiensi removal tertinggi yaitu pada konsentrasi 3000 mg/L. Resirkulasi dilakukan sebanyak tiga kali dan memberikan hasil yang ditampilkan pada Table 3. Hasil pada gambar 3 menunjukkan bahwa resirkulasi ternyata menurunkan efisiensi penyisihan dibandingkan dengan adsorpsi awal. Hasil penyisihan awal dengan fix bed column sebesar 48.07%.

Tabel 3
Konsentrasi kromium dengan resirkulasi

Massa Adsorben (g)	Concentration Awal Cr (VI) (mg/L)	Resirkulasi	Concentration Akhir Cr (VI) (mg/L)
100 gr	3000	0	1558
		1	1872
		2	1798
		3	1938

Sumber: data olahan



Sumber: data olahan

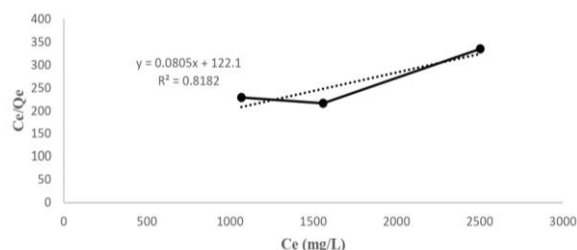
Gambar 3
Efek resirkulasi terhadap penyisihan kromium

Setelah dilakukan resirkulasi terjadi peningkatan konsentrasi kromium yang ditandai dengan penurunan efisiensi penyisihan menurun menjadi 37.6%, 40.06%, dan 35.4%. Penyerapan menurun dikarenakan adsorben telah mencapai titik jenuh dan resirkulasi mengakibatkan terlepasnya ion krom yang telah terserap pada adsorben (Koby et al., 2015). Penyisihan kromium mencapai kesetimbangan pada adsorpsi tanpa resirkulasi dimana efisiensi penyisihan mencapai nilai maksimum pada 48.07%. Tersedianya luas permukaan adsorben mendorong ion logam teradsorpsi dengan cepat ke situs yang lebih aktif pada permukaan adsorben. Setelah permukaan yang tersedia terisi, proses adsorpsi menjadi lebih lambat hingga mencapai jenuh. Saat mencapai kesetimbangan ion logam yang teradsorpsi sama dengan ion yang terdesorpsi (Al-Malack & Basaleh, 2016; Suzaki et al., 2017).

Model Langmuir and Freundlich

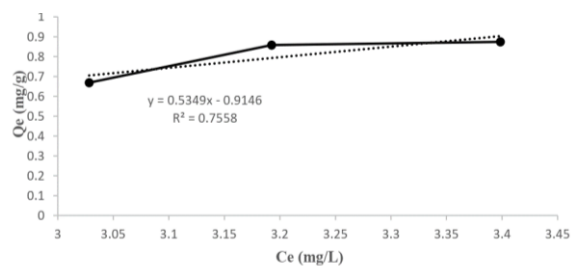
Mekanisme penyerapan ion logam selama proses adsorpsi dianalisis dengan isotherm models. Isotherm models yang digunakan pada penelitian ini adalah Freundlich dan Langmuir. Isotherm model digunakan selain untuk menganalisis mekanisme penyerapan selama proses adsorpsi, juga dapat menjelaskan kesetimbangan antara konsentrasi adsorben dan adsorbat yang sebanding dengan kecepatan penyerapannya (Sankaran et al. 2020). Model Langmuir untuk proses adsorpsi pada penelitian ini mendapatkan nilai $R^2 = 0.818$ dengan persamaan $y = 0.0805x + 122.1$ yang menunjukkan hubungan korelasi yang sangat kuat (Gambar 4). Sementara model Freundlich mendapatkan nilai $R^2 = 0.7558$ dengan

persamaan $y = 0.5249x - 0.914$ (Gambar 5). Nilai R^2 pada model Langmuir lebih tinggi dibandingkan pada model Freundlich, yang menunjukkan bahwa model adsorpsi Cr(VI) lebih tepat pada model Langmuir daripada Freundlich yang berarti proses adsorpsi terjadi pada *single layer* pada permukaan yang homogen.



Sumber: data olahan

Gambar 4
Model Langmuir model pada penyisihan kromium



Sumber: data olahan

Gambar 5
Model Freundlich pada penyisihan Kromium

Tabel 4
Konstanta Langmuir and Freundlich

Langmuir model	Nilai
Kapasitas adsorpsi, Q_m	1.242
Konstanta kesetimbangan adsorpsi, K_L	2.95
Konstanta Langmuir, RL	0.431
R^2	0.818
Freundlich model	Nilai
Kapasitas adsorpsi, K_f	8.21
Tipikal adsorpsi, $1/n$	0.5349
Intensitas adsorpsi, n	1.8695
R^2	0.7558

Sumber: data olahan

Pada isotherm Langmuir, nilai RL (dimensi kuantitas adsorpsi) menunjukkan indikasi proses adsorpsi menguntungkan (*favourable*) jika $0 < RL < 1$ yang menandakan proses adsorpsi bersifat reversibel (dapat terjadi desorpsi). Jika $RL = 0$ maka proses adsorpsi bersifat irreversibel, $RL = 1$ adalah linear dan

$RL > 1$ adalah adsorpsi *unfavorable* (Zang et al., 2022). Nilai RL untuk adsorpsi Cr(VI) pada penelitian ini sebesar 0.431, sehingga dapat dikatakan bahwa proses adsorpsi *favourable* dan bersifat *reversible*. Terdapat gaya tarik-menarik akibat adanya perbedaan energi sehingga menyebabkan ion logam berikatan dengan molekul adsorben.

Pada isotherm Freundlich, nilai Kf dan n mengindikasikan intensitas adsorpsi. Untuk mengetahui kekuatan interaksi antara adsorben dan adsorbat dapat dilihat dari nilai $1/n$, dimana semakin kecil nilai $1/n$ maka semakin kuat interaksi antara adsorben dengan adsorbat. Nilai $1/n$ antara 0-1 menyatakan bahwa proses adsorpsi terjadi secara heterogen dan semakin mendekati angka 0 maka menyatakan proses adsorpsi sangat cocok dikatakan heterogen. Pada penelitian ini, proses adsorpsi penyisihan kromium dengan adsorben lumpur memiliki nilai $1/n = 0.5349$. Hal ini mengindikasikan bahwa proses adsorpsi terjadi secara heterogen.

Adsorben yang berasal dari Palm Oil Mill sludge pada studi ini mempunyai efisiensi yang cukup baik dalam menyerap logam Cr(VI). Studi lain yang dilakukan Goh et al. (2019) menunjukkan bahwa Palm Oil Mill sludge adsorbent mampu mereduksi Cu dan Cd sebanyak 48.8 mg/g dan 46.2 mg/g dengan persentase penyisihan di atas 80%. Pemanfaatan limbah lumpur POM sebagai adsorben dapat menjadi alternatif pengolahan limbah lumpur industri menjadi produk yang berguna. Salah satu tantangan utama adalah diperlukan tingkat adsorpsi yang lebih tinggi untuk membuat aplikasi adsorben lumpur lebih ekonomis layak secara ekonomi dan layak secara teknis agar dapat digunakan dalam skala yang lebih luas. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa adsorben lumpur memiliki efisiensi yang tinggi, daya penyerapan yang kuat, dan signifikansi yang ramah lingkungan untuk pengendalian pencemaran air. Diharapkan bahwa wawasan yang diberikan dalam tinjauan ini akan mendorong lebih banyak upaya yang berkontribusi pada persiapan dan modifikasi adsorben lumpur, sehingga penerapannya untuk perbaikan lingkungan dapat ditingkatkan.

SIMPULAN

Adsorben lumpur limbah mampu menyisihkan kromium dengan efektifitas tertinggi sebesar 48,07% dari konsentrasi awal 3000 mg/l dengan massa adsorben 100 gram. Pada studi ini menunjukkan bahwa peningkatan

konsentrasi kromium membutuhkan jumlah adsorben yang lebih banyak agar mampu meningkatkan penyisihan kromium. Resirkulasi tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap penyisihan kromium. Resirkulasi menyebabkan terlepasnya kembali ion kromium yang terserap pada pori-pori adsorben sehingga efisiensi penyisihan semakin menurun. Model isotherm Langmuir menggambarkan proses adsorpsi yang lebih tepat pada Palm Oil Sludge dengan nilai korelasi sebesar 0,8182. Studi lebih lanjut dibutuhkan untuk memproduksi adsorben dari lumpur limbah PKS yang hemat energi dan rendah biaya (*low-cost*).

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Malack, M. H., & Basaleh, A. A. 2016. Adsorption of heavy metals using activated carbon produced from municipal organic solid waste. *Desalination and Water Treatment*, 57(51), 24519–24531.
- Andini, A. 2017. Analisa Kadar Kromium VI [Cr (VI)] Air Di Kecamatan Tanggulangin Sidoarjo. *Jurnal SainHealth*, 1(2), 55-58.
- Burakov, A. E., Galunin, E. V., Burakova, I. V., Kucheroval, A. E., Agarwal, S., Tkachev, A. G., & Gupta, V. K., 2018. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for wastewater treatment purposes: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 148, 702-712.
- Goh, C. L., Sethupathi, S., Bashir, M. J., & Ahmed, W. 2019. Adsorptive behaviour of palm oil mill sludge biochar pyrolyzed at low temperature for copper and cadmium removal. *Journal of environmental management*, 237, 281-288.
- Gong, X., Li, W., Wang, K., Hu, J., 2013. Study of the adsorption of Cr(VI) by tannic acid immobilised powdered activated carbon from micro-polluted water in the presence of dissolved humic acid. *Bioresour. Technol.* 141, 145-151
- Gupta, V. K., Agarwal, S., Bharti, A. K., & Sadegh, H. 2017. Adsorption mechanism of functionalized multi-walled carbon nanotubes for advanced Cu (II) removal. *Journal of Molecular Liquids*, 230, 667–673.
- Kobyas, M., Erdem, N., & Demirbas, E. 2015. Treatment of Cr, Ni and Zn from

- galvanic rinsing wastewater by electrocoagulation process using iron electrodes. *Desalination and Water Treatment*, 56(5), 1191–1201.
- Kuroki, A., Hiroto, M., Urushihara, Y., Horikawa, T., Sotowa, K. I., & Alcántara Avila, J. R. 2019. Adsorption mechanism of metal ions on activated carbon. *Adsorption*, 25, 1251–1258.
- Rajabi, M., Mirza, B., Mahanpoor, K., Mirjalili, M., Najafi, F., Moradi, O., Sadegh, H., Shahryari-ghoshekandi, R., Asif, M., Tyagi, I., Agarwal, S., & Gupta, V. K. 2016. Adsorption of malachite green from aqueous solution by carboxylate group functionalized multi-walled carbon nanotubes: Determination of equilibrium and kinetics parameters. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 34, 130–138.
- Regkouzas, P., & Diamadopoulos, E. 2019. Adsorption of selected organic micro-pollutants on sewage sludge biochar. *Chemosphere*, 224, 840–851.
- Sankaran, R., Show, P. L., Ooi, C. W., Ling, T. C., Shu-Jen, C., Chen, S. Y., & Chang, Y. K. 2020. Feasibility assessment of removal of heavy metals and soluble microbial products from aqueous solutions using eggshell wastes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 22(4), 773–786.
- Suzaki, P. Y. R., Munaro, M. T., Triques, C. C., Kleinübing, S. J., Fagundes Klen, M. R., Bergamasco, R., & de Matos Jorge, L. M. 2017. Phenomenological mathematical modeling of heavy metal biosorption in fixed-bed columns. *Chemical Engineering Journal*, 326, 389–400.
- Wang, Q., Li, J. shan, & Poon, C. S. 2019. Recycling of incinerated sewage sludge ash as an adsorbent for heavy metals removal from aqueous solutions. *Journal of Environmental Management*, 247, 509–517.
- Xu, G., Yang, X., & Spinosa, L., 2015. Development of sludge-based adsorbents: Preparation, characterization, utilization and its feasibility assessment. *Journal of Environmental Management*, 151, 221–232.
- Zhang, Y., Liu, Q., Ma, W., Liu, H., Zhu, J., Wang, L., Pei, H., Liu, Q., & Yao, J. 2022. Insight into the synergistic adsorption-reduction character of kromium (VI) onto poly (pyrogallol-tetraethylene pentamine) microsphere in synthetic wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science*, 609, 825–837.