

Pengaruh Variasi Massa dan Waktu Kontak Biochar Lumpur IPAL Teraktivasi NaOH terhadap Adsorpsi Cr(VI)

Brigita Karin Nainggolan, Danisa Dwi Anggraeni, Herawati Budiastuti*, Lidya Risang Ayu

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung, Indonesia

*Koresponden email: herabudi@polban.ac.id

Diterima: 7 Agustus 2026

Disetujui: 17 Agustus 2026

Abstract

Textile wastewater frequently contains hexavalent chromium [Cr(VI)], a toxic and carcinogenic heavy metal that must be treated before discharge. This study evaluated NaOH-activated biochar from the wastewater treatment plant (WWTP) sludge of a snack-food industry as Cr(VI) adsorbent. The biochar was prepared by carbonizing WWTP dried sludge at 500°C for 2 hours, followed by activation with a 2 M NaOH for 24 hours. Batch adsorption was carried out in 100 mL of 100 mg/L synthetic Cr(VI) solution at pH 2, using adsorbent doses of 3–7 g and contact times of 30–90 minutes. Biochar morphology was examined by SEM, while residual Cr(VI) was measured by UV-Vis spectrophotometry at 540 nm. SEM images showed that NaOH activation produced a rougher, more porous surface with a more even pore distribution than the non-activated biochar. The highest removal efficiency, 15.8%, was obtained at a dose of 7 g and a contact time of 60 minutes, with a maximum adsorption capacity of 0.2201 mg/g; non-activated biochar removed only 3.3% of Cr(VI) under the same conditions. Results show that NaOH activation, adsorbent mass, and contact time affect the Cr(VI) removal performance of WWTP-sludge biochar, although its ash content and iodine number remained below the SNI 06-3730-1995 standard.

Keywords: *biochar, wwtp sludge, naoh activation, adsorption, cr(vi)*

Abstrak

Air limbah industri tekstil sering mengandung logam berat kromium heksavalen [Cr(VI)] yang bersifat toksik dan karsinogenik sehingga perlu diolah sebelum dibuang ke lingkungan. Penelitian ini mengevaluasi biochar teraktivasi NaOH berbahan baku lumpur IPAL industri makanan ringan sebagai adsorben Cr(VI). Biochar dibuat melalui karbonisasi lumpur IPAL kering pada suhu 500°C selama 2 jam, kemudian diaktivasi menggunakan larutan NaOH 2 M selama 24 jam. Proses adsorpsi batch dilakukan pada 100 mL larutan Cr(VI) 100 ppm dengan pH 2, variasi massa adsorben 3–7 gram, serta waktu kontak 30–90 menit. Morfologi biochar dikarakterisasi menggunakan SEM, sedangkan konsentrasi Cr(VI) dianalisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 540 nm. Hasil SEM menunjukkan bahwa aktivasi NaOH menghasilkan permukaan biochar yang lebih kasar, berongga, dan berdistribusi pori lebih merata dibandingkan biochar tanpa aktivasi. Efisiensi adsorpsi tertinggi sebesar 15,8% diperoleh pada massa adsorben 7 gram dan waktu kontak 60 menit, dengan kapasitas adsorpsi maksimum 0,2201 mg/g; biochar tanpa aktivasi hanya menghasilkan efisiensi 3,3% pada kondisi yang sama. Hasil ini menunjukkan bahwa aktivasi NaOH, massa adsorben, dan waktu kontak berpengaruh signifikan terhadap kinerja adsorpsi biochar lumpur IPAL, meskipun kadar abu dan daya serap iodin biochar masih belum memenuhi baku mutu karbon aktif sesuai SNI 06-3730-1995.

Kata Kunci: *biochar, lumpur ipal, aktivasi naoh, adsorpsi, cr(vi)*

1. Pendahuluan

Aktivitas produksi industri tekstil menghasilkan air limbah yang mengandung berbagai zat pencemar berbahaya, terutama logam berat yang berasal dari proses pewarnaan. Salah satu logam berat yang umum ditemukan adalah kromium heksavalen [Cr(VI)], yang bersifat toksik, mutagenik, dan karsinogenik, dengan toksisitas hampir seratus kali lebih tinggi dibandingkan Cr(III) [1], [2]. Kandungan Cr(VI) pada air limbah industri tekstil di salah satu pabrik di Kabupaten Bandung tercatat mencapai 1,1419 mg/L [1], jauh melampaui baku mutu air limbah yang dipersyaratkan sehingga pengolahan lanjutan mutlak diperlukan sebelum air limbah dibuang ke badan air.

Di sisi lain, meningkatnya aktivitas industri turut meningkatkan volume lumpur yang dihasilkan oleh instalasi pengolahan air limbah (IPAL). Lumpur sekunder hasil proses biologis pada dasarnya masih mengandung karbon organik dalam jumlah cukup besar, sehingga berpotensi diolah menjadi biochar

melalui proses karbonisasi. Biochar berbahan baku lumpur IPAL industri makanan dilaporkan memiliki kandungan karbon antara 11,21–33,6% (basis kering) dengan suhu karbonisasi optimum 500°C selama 2 jam [3]. Akan tetapi, biochar hasil karbonisasi umumnya memiliki struktur pori yang belum berkembang optimal sehingga kapasitas adsorpsinya masih rendah.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pemanfaatan biochar/karbon aktif berbahan lumpur IPAL untuk menyisihkan Cr(VI). Karbon aktif lumpur IPAL yang diaktivasi H_3PO_4 dilaporkan mampu mencapai efisiensi penyisihan hingga 97,6% [4], sedangkan biochar lumpur IPAL tanpa aktivasi hanya mampu menyisihkan 14,29% Cr(VI) dengan waktu kontak 24 jam dan memerlukan waktu hingga 30 hari untuk mencapai efisiensi 26% [5]. Perbandingan tersebut menegaskan bahwa proses aktivasi sangat menentukan kinerja adsorpsi biochar. Salah satu metode aktivasi kimia yang banyak digunakan adalah aktivasi basa menggunakan NaOH, yang bekerja dengan membuka struktur karbon, memperbesar luas permukaan, dan meningkatkan jumlah gugus fungsi permukaan yang mengandung oksigen [6], [7], [8]. Penelitian sebelumnya melaporkan bahwa aktivasi biochar lumpur domestik menggunakan NaOH 2 M selama 24 jam berhasil meningkatkan luas permukaan spesifik biochar sekitar tiga kali lipat, dari 28,9 m²/g menjadi 86,41 m²/g [9].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan lumpur IPAL industri makanan ringan sebagai bahan baku biochar yang diaktivasi menggunakan NaOH, mengkarakterisasikan biochar sebelum dan sesudah aktivasi, serta mengevaluasi pengaruh variasi massa adsorben (3, 5, dan 7 gram) dan waktu kontak (30, 60, dan 90 menit) terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi Cr(VI) pada larutan artifisial berkonsentrasi 100 ppm dan pH 2. Kinerja biochar teraktivasi juga dibandingkan dengan biochar tanpa aktivasi pada kondisi optimum untuk mengkonfirmasi peran aktivasi NaOH terhadap peningkatan kinerja adsorpsi.

2. Metodologi Penelitian

Bahan Baku dan Preparasi Biochar

Bahan baku yang digunakan adalah lumpur IPAL yang berasal dari salah satu pabrik makanan ringan di Cianjur, Jawa Barat. Lumpur dijemur di bawah sinar matahari selama ± 3 hari, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu $\pm 150^\circ\text{C}$ hingga diperoleh berat konstan. Lumpur kering dihaluskan dan diayak menggunakan ayakan 60 mesh untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Proses karbonisasi dilakukan di dalam furnace pada suhu 500°C selama 2 jam dengan kondisi oksigen terbatas, mengacu pada kondisi optimum yang dilaporkan oleh Akter dkk. [3]. Biochar hasil karbonisasi didinginkan dalam desikator, dihaluskan, dan diayak kembali dengan ayakan 60 mesh.

Aktivasi Biochar

Biochar hasil karbonisasi diaktivasi secara kimia menggunakan larutan NaOH 2 M dengan perbandingan massa biochar terhadap volume larutan sebesar 1:50, mengacu pada prosedur Anastasiou dkk. [9]. Perendaman dilakukan selama 24 jam disertai pengadukan. Setelah aktivasi, biochar dicuci menggunakan aquadest hingga diperoleh pH netral untuk menghilangkan sisa NaOH, dikeringkan pada suhu 105°C hingga diperoleh berat konstan, kemudian dihaluskan, dan diayak kembali dengan ayakan 60 mesh.

Larutan Uji Cr(VI)

Limbah artifisial Cr(VI) dibuat dengan melarutkan $K_2Cr_2O_7$ hingga diperoleh konsentrasi Cr(VI) sebesar 100 ppm. pH larutan diatur menjadi 2 menggunakan H_2SO_4 2N, mengacu pada kondisi pH optimum adsorpsi Cr(VI) yang dilaporkan pada beberapa penelitian terdahulu [4], [5], [10].

Prosedur Adsorpsi

Proses adsorpsi dilakukan secara batch di dalam erlenmeyer tertutup menggunakan *magnetic stirrer* untuk menjaga homogenitas campuran. Variasi massa adsorben biochar teraktivasi NaOH sebesar 3, 5, dan 7 gram dikontakkan dengan 100 mL larutan Cr(VI) 100 ppm selama 60 menit untuk menentukan massa optimum. Selanjutnya, pada massa optimum dilakukan variasi waktu kontak 30, 60, dan 90 menit. Sebagai pembanding, dilakukan pula adsorpsi menggunakan biochar tanpa aktivasi pada kondisi massa dan waktu kontak optimum. Setelah proses adsorpsi, larutan disaring menggunakan pompa vakum dan filtrat ditampung untuk dianalisis.

Karakterisasi Biochar dan Analisis Data

Karakteristik biochar meliputi kadar air, kadar abu, dan daya serap iodin dimana analisis mengacu pada SNI 06-3730-1995 tentang karbon aktif teknis [11], sedangkan morfologi permukaan biochar sebelum dan sesudah aktivasi diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada perbesaran 1000× dan 10000×. Konsentrasi Cr(VI) pada limbah artifisial dianalisis berdasarkan SNI 6989.71:2009 menggunakan spektrofotometer UV-Vis dengan pereaksi 1,5-difenilkarbazida pada panjang gelombang

540 nm. Efisiensi penurunan konsentrasi Cr(VI) dan kapasitas adsorpsi masing-masing dihitung menggunakan Persamaan (1) dan (2):

$$\%Efisiensi = [(C_o - C_e)/C_o] \times 100\% \quad (1)$$

$$q_e = [(C_o - C_e) \times V] / m \quad (2)$$

dengan C_o dan C_e berturut-turut adalah konsentrasi Cr(VI) awal dan akhir (ppm), q_e adalah kapasitas adsorpsi (mg/g), V adalah volume larutan adsorbat (L), dan m adalah massa adsorben (g).

3. Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Biochar

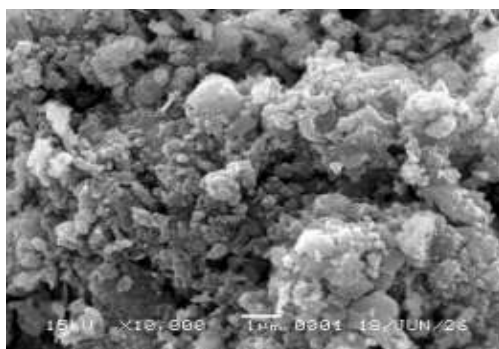
Biochar lumpur IPAL hasil karbonisasi dikarakterisasi mengacu pada SNI 06-3730-1995 untuk memastikan mutu biochar sebagai adsorben. Hasil pengujian disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil karakterisasi biochar lumpur IPAL teraktivasi NaOH

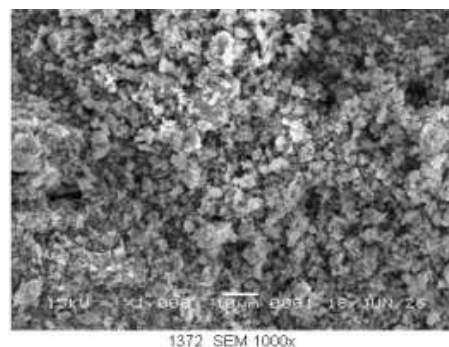
Parameter	Satuan	Hasil	Syarat SNI	Keterangan
Kadar air	%	2,60	Maks. 15	Memenuhi
Kadar abu	%	72,63	Maks. 10	Tidak memenuhi
Daya serap iodine	mg/g	276,5	Min. 750	Tidak memenuhi

Kadar air biochar sebesar 2,60% telah memenuhi baku mutu (maksimum 15%), menunjukkan bahwa pori biochar relatif tidak terhalang oleh air sehingga mendukung proses adsorpsi. Sebaliknya, kadar abu sebesar 72,63% jauh melampaui batas maksimum 10% yang dipersyaratkan. Tingginya kadar abu ini sejalan dengan hasil penelitian Khitous dan Trari yang melaporkan kadar abu biochar lumpur IPAL sebesar 83,2% [10], dan diduga disebabkan oleh tingginya kandungan mineral anorganik (Si, P, Al, Ca, Fe) yang tetap bertahan selama karbonisasi lumpur, sebagaimana juga dilaporkan pada biochar lumpur dengan kadar abu tinggi [12]. Kandungan mineral yang tinggi tersebut dapat menutupi sebagian pori dan mengurangi luas permukaan aktif biochar [13], yang juga tercermin dari rendahnya nilai daya serap iodine (276,5 mg/g), jauh di bawah baku mutu minimum 750 mg/g. Meskipun demikian, kadar abu dan daya serap iodine bukan satu-satunya faktor penentu keberhasilan adsorpsi Cr(VI), karena kinerja adsorpsi juga sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi dan karakter permukaan adsorben [14]. Oleh karena itu, pengujian kinerja biochar sebagai adsorben Cr(VI) tetap dilanjutkan.

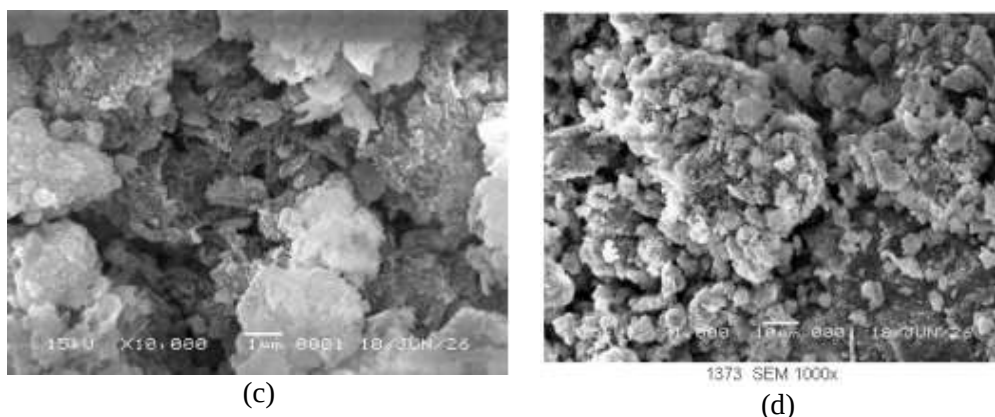
Hasil uji SEM (**Gambar 1**) memperlihatkan bahwa sebelum aktivasi, permukaan biochar tampak menggumpal dan relatif padat dengan struktur pori yang belum berkembang karena sebagian pori masih tertutupi oleh pengotor dari bahan baku. Setelah diaktivasi dengan NaOH 2 M selama 24 jam, permukaan biochar menjadi lebih kasar, tampak lebih berongga, dan distribusi porinya lebih merata. Perubahan morfologi ini konsisten dengan temuan Anastasiou dkk. pada biochar lumpur domestik yang diaktivasi NaOH [9], dan sejalan dengan mekanisme yang dikemukakan oleh Hafizuddin dkk., yaitu reaksi NaOH dengan struktur karbon menghasilkan gas H_2 , CO , dan CO_2 yang mendorong pembentukan mikropori baru serta melarutkan senyawa pengotor pada permukaan karbon [6]. Hasil ini mengindikasikan bahwa aktivasi NaOH efektif memperbaiki karakteristik fisik biochar dan berpotensi meningkatkan kemampuan adsorpsinya.



(a)



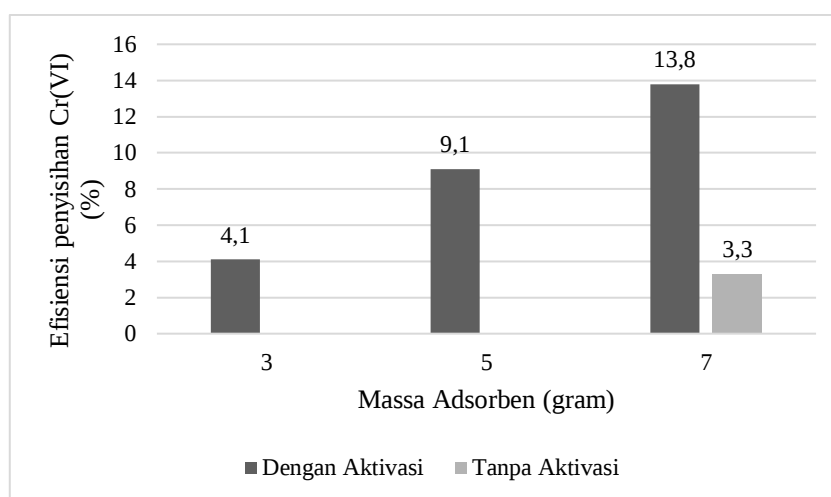
(b)



Gambar 1. Hasil uji SEM biochar: (a) sebelum aktivasi (10000×), (b) sebelum aktivasi (1000×), (c) setelah aktivasi NaOH (10000×), dan (d) setelah aktivasi NaOH (1000×)

Pengaruh Massa Adsorben terhadap Efisiensi Adsorpsi Cr(VI)

Pengaruh variasi massa adsorben (3, 5, dan 7 gram) terhadap efisiensi penyisihan Cr(VI) pada waktu kontak 60 menit ditunjukkan pada **Gambar 3**.



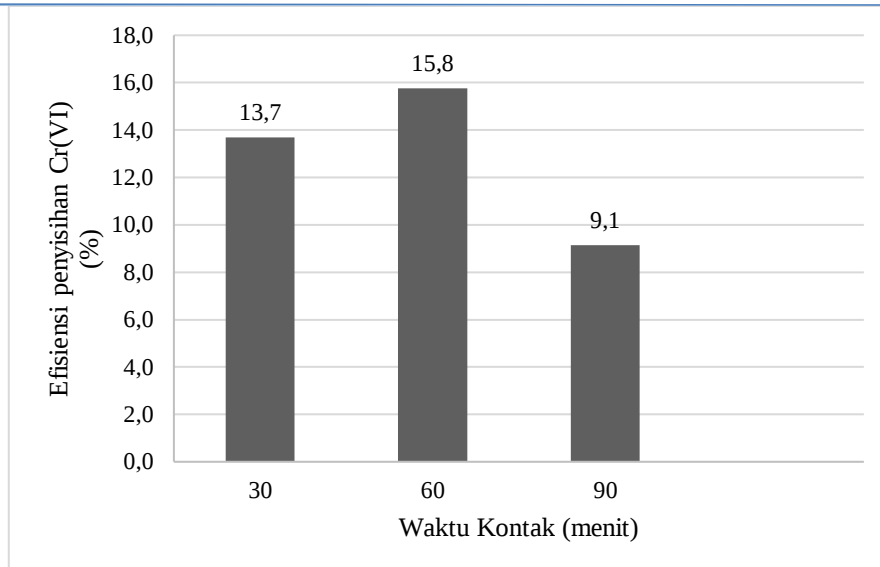
Gambar 3. Pengaruh massa adsorben terhadap efisiensi penyisihan Cr(VI)

Efisiensi adsorpsi meningkat dari 4,1% pada massa adsorben 3 gram menjadi 9,1% pada 5 gram dan 13,8% pada 7 gram. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa penambahan massa adsorben memperbesar luas permukaan dan jumlah situs aktif yang tersedia untuk berinteraksi dengan ion Cr(VI) [15]. Efisiensi tertinggi pada penelitian ini (13,8% pada massa 7 gram) masih jauh lebih rendah dibandingkan hasil Khitous dan Trari yang mencapai 84,65% pada dosis 5 g/L menggunakan biochar lumpur IPAL perkotaan tanpa aktivasi [10], maupun Aliakbari dkk. yang memperoleh efisiensi 79% dengan dosis 5 g/L menggunakan biochar teraktivasi H_3PO_4 [4]. Perbedaan ini diduga disebabkan oleh karakteristik lumpur IPAL industri makanan ringan yang mengandung lebih banyak komponen anorganik (Si, Ca, P, Mg, K, Al) dibandingkan lumpur perkotaan [3], sehingga kadar abu biochar pada penelitian ini jauh lebih tinggi dan menyebabkan sebagian pori tertutup, sebagaimana telah dibahas pada bagian karakterisasi biochar.

Untuk mengkonfirmasi peran aktivasi, dilakukan pula adsorpsi menggunakan biochar tanpa aktivasi pada massa optimum 7 gram. Biochar tanpa aktivasi hanya menghasilkan efisiensi 3,3%, jauh lebih rendah dibandingkan biochar teraktivasi (13,8%). Hasil ini konsisten dengan hasil uji SEM (**Gambar 1**) yang menunjukkan bahwa aktivasi NaOH membuka pori dan memperluas permukaan biochar, sehingga menyediakan lebih banyak situs aktif untuk mengikat ion Cr(VI) [6], [9].

Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Adsorpsi Cr(VI)

Pengaruh waktu kontak (30, 60, dan 90 menit) terhadap efisiensi adsorpsi Cr(VI) pada massa adsorben optimum (7 gram) ditunjukkan pada **Gambar 4**.



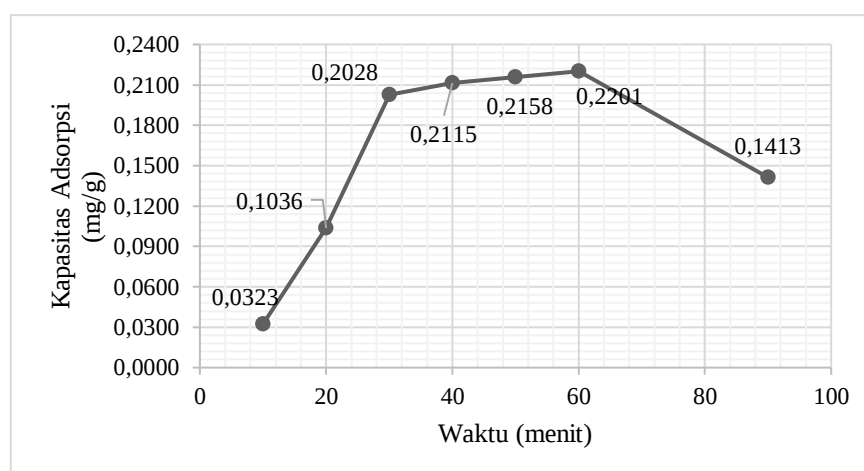
Gambar 4. Pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi penyisihan Cr(VI)

Efisiensi adsorpsi meningkat dari 13,7% pada waktu kontak 30 menit menjadi 15,8% pada 60 menit, kemudian menurun menjadi 9,1% pada 90 menit. Peningkatan pada rentang 30–60 menit terjadi karena situs aktif pada permukaan biochar masih tersedia untuk mengikat ion Cr(VI), sedangkan penurunan pada 90 menit mengindikasikan mulai terjadinya desorpsi, yaitu terlepasnya kembali sebagian ion Cr(VI) yang sebelumnya telah teradsorpsi setelah sistem mendekati kesetimbangan [16]. Pola serupa juga dilaporkan oleh Khitous dan Trari yang memperoleh waktu kontak optimum 60 menit pada adsorpsi Cr(VI) menggunakan biochar berbasis lumpur [10]. Efisiensi 15,8% dalam waktu kontak 60 menit pada penelitian ini juga lebih tinggi dibandingkan biochar lumpur IPAL tanpa aktivasi yang menurut Fei dkk. memerlukan waktu kontak hingga 30 hari untuk mencapai efisiensi 26% [5], yang mengindikasikan bahwa aktivasi NaOH mempercepat pencapaian efisiensi penyisihan Cr(VI).

Pada kondisi asam (pH 2), ion Cr(VI) yang dominan adalah bikromat (HCrO_4^-) dan dikromat ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$), sedangkan gugus fungsi permukaan biochar seperti hidroksil ($-\text{OH}$) dan karboksil ($-\text{COOH}$) mengalami protonasi sehingga permukaan biochar bermuatan positif [17]. Kondisi ini meningkatkan gaya tarik elektrostatis terhadap ion Cr(VI) yang bermuatan negatif sehingga adsorpsi dapat berlangsung lebih efektif. Selain itu, sifat alkalis biochar lumpur IPAL menyebabkan pH larutan cenderung meningkat setelah proses adsorpsi, sebagaimana juga dilaporkan oleh Fei dkk. [5].

Kapasitas Adsorpsi Cr(VI)

Profil kapasitas adsorpsi Cr(VI) terhadap waktu kontak pada massa adsorben optimum (7 gram) ditunjukkan pada **Gambar 5**.



Gambar 5. Pengaruh waktu kontak terhadap kapasitas adsorpsi Cr(VI)

Kapasitas adsorpsi meningkat cepat pada rentang waktu 10–30 menit karena banyaknya situs aktif yang masih tersedia, kemudian laju peningkatannya melandai hingga mencapai kapasitas maksimum

sebesar 0,2201 mg/g pada waktu kontak 60 menit. Nilai ini sejalan dengan pola yang dilaporkan oleh Khitous dan Trari yang juga memperoleh waktu kontak optimum 60 menit pada adsorpsi Cr(VI) menggunakan biochar berbasis lumpur, meskipun kapasitas adsorpsi mereka jauh lebih besar (81,75 mg/g) [10]. Perbedaan besaran kapasitas adsorpsi tersebut sejalan dengan perbedaan efisiensi penyisihan yang telah dibahas sebelumnya, yang terutama disebabkan oleh tingginya kadar abu biochar lumpur IPAL industri makanan ringan pada penelitian ini. Sebagai pembanding lain Aji dkk. melaporkan kapasitas adsorpsi Cr(VI) sebesar 57,65 mg/g menggunakan karbon aktif ampas tebu teraktivasi KOH [18], yang menegaskan bahwa jenis bahan baku dan metode aktivasi sangat memengaruhi kapasitas adsorpsi akhir suatu adsorben. Kapasitas adsorpsi menurun menjadi 0,1413 mg/g pada waktu kontak 90 menit, memperkuat indikasi terjadinya desorpsi setelah sistem mencapai kondisi mendekati kesetimbangan.

4. Kesimpulan

Biochar lumpur IPAL industri makanan ringan memiliki kadar air 2,60% yang memenuhi SNI 06-3730-1995, sedangkan kadar abu (72,63%) dan daya serap iodin (276,5 mg/g) belum memenuhi baku mutu tersebut akibat tingginya kandungan mineral anorganik pada bahan baku. Hasil SEM menunjukkan bahwa aktivasi NaOH 2 M selama 24 jam berhasil membuat permukaan biochar yang lebih berpori dan lebih terbuka dibandingkan sebelum aktivasi. Variasi massa adsorben dan waktu kontak berpengaruh nyata terhadap efisiensi dan kapasitas adsorpsi Cr(VI); kondisi optimum diperoleh pada massa adsorben 7 gram dan waktu kontak 60 menit dengan efisiensi penyisihan sebesar 15,8% dan kapasitas adsorpsi maksimum 0,2201 mg/g, jauh lebih tinggi dibandingkan biochar tanpa aktivasi pada kondisi yang sama (efisiensi 3,3%). Hasil ini mengkonfirmasi bahwa aktivasi NaOH efektif meningkatkan kinerja biochar lumpur IPAL sebagai adsorben Cr(VI), meskipun kapasitas adsorpsinya masih perlu ditingkatkan melalui optimasi lebih lanjut.

5. Ucapan Terima Kasih

Terima kasih diucapkan untuk Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung yang telah memfasilitasi peralatan, bahan, dan tempat penelitian sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

6. Referensi

- [1] D. N. Ramadhini, D. A. H. Taroepatjeka, and D. Marganingrum, "Efisiensi penyisihan logam krom (Cr) dalam limbah cair industri tekstil menggunakan MPMO dan Nutrient Broth (NB)," in Proc. FTSP Series: Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir, Institut Teknologi Nasional Bandung, 2023, pp. 515–522.
- [2] S. Banerjee, B. Kamila, S. Barman, S. R. Joshi, T. Mandal, and G. Halder, "Interlining Cr(VI) remediation mechanism by a novel bacterium *Pseudomonas brenneri* isolated from coalmine wastewater," *J. Environ. Manage.*, vol. 233, pp. 271–282, 2019.
- [3] S. Akter, M. Shommi, M. A. Akbor, S. Yasmin, A. Nahar, S. Akhter, Y. N. Jolly, and M. K. Uddin, "Preparation and characterization of biochar: A case study on textile and food industry sludge management," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 7, p. 100282, 2023.
- [4] Z. Aliakbari, H. Younesi, A. A. Ghoreyshi, N. Bahramifar, and A. Heidari, "Sewage sludge-based activated carbon: Its application for hexavalent chromium from synthetic and electroplating wastewater in batch and fixed-bed column adsorption," *J. Environ. Manage.*, vol. 239, pp. 100–112, 2019.
- [5] Y.-H. Fei, M. Li, Z. Ye, J. Guan, Z. Huang, T. Xiao, and P. Zhang, "The pH-sensitive sorption governed reduction of Cr(VI) by sludge-derived biochar and the accelerating effect of organic acids," *J. Hazard. Mater.*, vol. 423, p. 127205, 2022.
- [6] M. S. Hafizuddin, C. L. Lee, K. L. Chin, P. S. H'ng, P. S. Khoo, and U. Rashid, "Fabrication of highly microporous structure activated carbon via surface modification with sodium hydroxide," *Polymers*, vol. 13, no. 22, p. 3954, 2021.
- [7] H. Budiastuti, N. S. Badarjihadi, T. D. Purnama, E. Widiastuti, "Carbonization of rice husk for adsorption of phosphate compounds: Influence of temperature and NaOH activator" in Proc. E3S Web of Conferences, 2024, 479, 04004, pp. 1-8, doi: 10.1051/e3sconf/202447904004.
- [8] N. A. Berliany, N. A. Hidayat, H. Budiastuti, E. Widiastuti, "Pengaruh konsentrasi aktivator NaOH terhadap kinerja karbon aktif kulit kacang tanah sebagai adsorben fosfat dalam limbah laundry," *J. Teknik Kimia*, vol. 29, no. 2, pp. 54-61, 2023, doi: 10.36706/jtk.v29i2.1148.

- [9] M. Anastasiou, V. Sakkas, and M. Sleiman, "Activated biochar from sewage sludge: A sustainable solution for effective removal of emerging water contaminants," *Molecules*, vol. 30, no. 17, p. 3514, 2025.
- [10] M. Khitous and M. Trari, "Synthesis and characterization of sewage sludge-derived biochar for treating Cr(VI)-contaminated wastewater," *J. Indian Chem. Soc.*, vol. 103, no. 2, p. 102443, 2026.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, SNI 06-3730-1995: Arang Aktif Teknis. Jakarta: BSN, 1995.
- [12] J. Fan, Y. Li, H. Yu, Y. Li, Q. Yuan, H. Xiao, F. Li, and B. Pan, "Using sewage sludge with high ash content for biochar production and Cu(II) sorption," *Sci. Total Environ.*, vol. 713, p. 136663, 2020.
- [13] G. Pari, D. T. Widayati, and M. Yoshida, "Mutu arang aktif dari serbuk gergaji kayu," *J. Penelitian Hasil Hutan*, vol. 27, no. 4, pp. 381–398, 2009.
- [14] Ruliatima, "Studi kinetika adsorpsi Cr(VI) oleh karbon aktif dari tandan kosong kelapa sawit," Tesis Magister, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2013.
- [15] Siswanti, Y. Putri, and A. H. Oktaviana, "Adsorpsi zat warna Remazol Brilliant Blue R pada limbah industri batik menggunakan adsorben dari mahkota buah nanas," *Eksergi J. Ilmiah Teknik Kimia*, vol. 21, no. 1, p. 10, 2024.
- [16] F. Gorzin and M. M. B. R. Abadi, "Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution by adsorbent prepared from paper mill sludge: Kinetics and thermodynamics studies," *Adsorpt. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 1–2, pp. 149–169, 2018.
- [17] X. Guo, A. Liu, J. Lu, X. Niu, M. Jiang, Y. Ma, X. Liu, and M. Li, "Adsorption mechanism of hexavalent chromium on biochar: Kinetic, thermodynamic, and characterization studies," *ACS Omega*, vol. 5, pp. 27323–27331, 2020.
- [18] S. S. Aji, N. M. S. Sunyoto, M. Z. B. M. H. Yusoff, H. Y. Setyawan, I. A. Dewi, S. Anggraini, and Hariana, "Aplikasi biochar ampas tebu teraktivasi KOH untuk adsorpsi kromium dan fitotoksitasnya terhadap kacang hijau (*Vigna radiata*)," *J. Teknologi Pertanian*, vol. 26, no. 2, pp. 165–182, 2025.