

Penyisihan Ion Logam Cr(VI) dari Larutan Menggunakan Biosorben Berbasis Limbah Pertanian Bagase Sorgum Teraktivasi NaOH

Removal of Cr(VI) Metal Ion from Solution Using Biosorbent Based on Agricultural Waste Sorghum Bagasse Activated NaOH

Devi Indrasari Mustopa Putri^a, Handoko Darmokoesoemo^{a*}, Ganden Supriyanto^a, Navilla Zahro Female^a, Bernadeta Ayu Widyaningrum^b

^aDepartemen Kimia, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Airlangga, Mulyorejo, Surabaya, 60115, Indonesia

^bPusat Riset Biomassa dan Bioproduk, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), 16911, Cibinong, Indonesia

Artikel histori :

Diterima 8 September 2023
Diterima dalam revisi 26 April 2024
Diterima 29 April 2024
Online 6 Mei 2024

ABSTRAK: Kontaminasi logam kromium sangat berbahaya bagi lingkungan perairan yang terjadi melalui aktivitas industri. Saat ini penyisihan logam kromium dalam perairan banyak dipelajari untuk mengurangi tingkat toksisitasnya. Pada penelitian ini, limbah pertanian bagase sorgum yang diaktivasi dengan NaOH digunakan untuk mengadsorpsi ion logam Cr(VI) dalam larutan. Bagase sorgum teraktivasi NaOH dikarakterisasi menggunakan uji pH_{pzc} , FT-IR, SEM-EDX, XRD, dan metode BET untuk menganalisis gugus fungsi, morfologi permukaan, luas permukaan, serta ukuran pori pada material. Menggunakan sistem batch, parameter adsorpsi seperti massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi awal ion logam, pH, dan suhu larutan diamati. Adsorpsi Cr(VI) memiliki kondisi optimum pada pH 2, waktu kontak 70 menit, massa adsorben 900 mg, konsentrasi awal larutan 10 mg/L, dan suhu larutan 30 °C. Persentase kapasitas adsorpsi maksimum yang diperoleh adalah 99,03%. Model orde dua semu cocok untuk mengidentifikasi kinetika adsorpsi ion Cr(VI). Model isoterm adsorpsi ion Cr(VI) sesuai dengan model Freundlich. Energi bebas Gibbs diperoleh nilai positif dan entalpi memiliki nilai negatif, hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi ion Cr(VI) merupakan proses eksotermik. Oleh karena itu, upaya pengurangan kadar ion logam Cr(VI) di lingkungan perairan menggunakan adsorben bagase sorgum teraktivasi NaOH dapat dijadikan sebagai alternatif baru dengan perlakuan yang mudah dan bersifat ekonomis.

Kata Kunci: adsorpsi; bagase sorgum teraktivasi; Cr(VI); limbah pertanian

ABSTRACT: Chromium metal contamination is very harmful to the aquatic environment that occurs through industrial activities. Currently, the removal of chromium metal from water is widely studied to reduce its toxicity. In this study, agricultural waste sorghum bagasse activated with NaOH was used to adsorb Cr(VI) metal ions in solution. NaOH-activated sorghum bagasse was characterized using the pH_{pzc} test, FT-IR, SEM-EDX, XRD, and BET methods to analyze the functional groups, surface morphology, surface area, and pore size of the material. Using a batch system, adsorption parameters such as adsorbent mass, contact time, initial concentration of metal ions, pH, and solution temperature were observed. Cr(VI) adsorption had optimum conditions at pH 2, contact time 70 min, adsorbent mass 900 mg, initial solution concentration 10 mg/L, and solution temperature 30 °C. The maximum adsorption percentage capacity obtained was 99.03%. The pseudo-second-order model is suitable for identifying the adsorption kinetics of Cr(VI) ions. The adsorption isotherm model of Cr(VI) ion was suitable with the Freundlich model. The Gibbs free energy obtained a positive value and the enthalpy had a negative value, indicating that the adsorption of Cr(VI) ions is an exothermic process. Therefore, efforts to reduce Cr(VI) metal ion levels in the aquatic environment using NaOH-activated sorghum bagasse adsorbent can be used as a new alternative with easy and economical treatment.

Keywords: adsorption; activated sorghum bagasse; Cr(VI); agricultural waste

* Corresponding author

Email address: handoko-d@fst.unair.ac.id

1. Pendahuluan

Dengan kemajuan ilmu pengetahuan yang semakin pesat, manusia semakin berupaya memenuhi kebutuhan mereka dalam kehidupan sehari-hari. Salah satu cara yang digunakan yaitu membangun berbagai macam industri. Kemajuan pesat dalam aktivitas industri ini membawa dampak positif dan negatif yang beragam. Salah satu dampak negatif yaitu limbah industri logam berat karena memiliki tingkat toksisitas yang tinggi, serta tidak dapat terurai secara alami (Hauwa, *et al.*, 2020; Tahoon *et al.*, 2020). Salah satu jenis logam berat yang terdapat dalam limbah industri tersebut adalah kromium. Kromium dikategorikan sebagai karsinogenik no. 1 menurut *National Toxicology Program*. Kromium memiliki beberapa tingkat oksidasi, tetapi kromium trivalen [Cr(III)] dan kromium heksavalen [Cr(VI)] yang paling umum dan stabil di lingkungan alami (Ashraf *et al.*, 2017). Cr(III) memiliki sifat yang jauh lebih tidak beracun daripada Cr(VI) dan terjadi secara alami di lingkungan serta bersifat paling stabil di alam dan dalam sistem biologis (Rakhunde *et al.*, 2012). Sedangkan Cr(VI) sangat beracun dan bersifat karsinogenik. Paparan logam Cr(VI) dapat menyebabkan perforasi septum hidung, edema kulit, serangan asma, rinitis, radang tenggorokan, fibrosis paru, nyeri gastrointestinal akut, hati, dan nekrosis ginjal (Valentín-Reyes *et al.*, 2019).

Terdapat berbagai teknik remediasi untuk menghilangkan ion logam dari larutan, mulai dari metode fisika-kimia tradisional hingga metode bioremediasi (Vijayaraghavan & Balasubramanian, 2015). Meskipun demikian, metode-metode tersebut memiliki beberapa kelemahan utama diantaranya yaitu menghasilkan kotoran yang beracun, penghilangan logam yang terpisah-pisah, memiliki efisiensi yang rendah, serta konsumsi energi dan reagen yang tinggi (Lakkimsetty & Prabhakar, 2011). Di antara berbagai teknologi pengolahan, adsorpsi telah berkembang sebagai metode yang sangat disukai untuk mengolah air limbah karena metode ini memiliki beberapa keuntungan seperti ramah lingkungan, operasi sederhana, efisiensi yang tinggi, bebas polusi sekunder, regenerasi mudah, dan hemat biaya (Ajitha *et al.*, 2017; Deng *et al.*, 2017). Metode adsorpsi seperti biosorpsi dianggap efektif karena selain kemampuannya dalam menangkap ion-ion logam, juga relatif mudah untuk mengeluarkan (desorpsi) ion-ion logam yang telah terikat (Komari *et al.*, 2012). Pendekatan ini melibatkan penggunaan biomassa dari tanaman sebagai bahan adsorben. Bahan tersebut dinilai ekonomis dan ramah lingkungan karena memiliki komposisi kimia yang unik, ketersediaannya melimpah, dan bersifat terbarukan (Mopoung & Kengkhetkit, 2016). Beberapa peneliti telah melakukan penelitian tentang adsorpsi polutan logam berat menggunakan biomassa seperti ampas tebu, sekam padi, sekam bunga matahari, ampas teh, kulit jeruk, serbuk gergaji, jamur shiitake (*Lentinula edodes*), limbah buah zaitun, dan lain-lain.

Tanaman serelia seperti sorgum merupakan salah satu jenis tanaman pertanian yang umumnya ditanam di Indonesia. Budidaya tanaman sorgum menghasilkan limbah pertanian bagase sorgum dalam jumlah besar setiap

tahunnya. Namun, pemanfaatan limbah pertanian bagase sorgum masih di bawah tingkat yang diharapkan sehingga keberadaannya masih berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah pertanian bagase sorgum perlu dieksplorasi lebih lanjut, misalnya sebagai adsorben yang berpotensi untuk menghilangkan logam berat. Sorgum adalah tanaman serbaguna yang memiliki potensi sebagai sumber makanan, pakan hewan, dan bahan baku industri (Kamal *et al.*, 2014). Kandungan gizi dalam tanaman sorgum sangat beragam, mencakup karbohidrat, lemak, kalsium, besi, dan fosfor dengan kadar yang cukup tinggi. Bagase sorgum tersusun atas 43,58% selulosa, 24,51% hemiselulosa, dan 26,22% lignin (Martins *et al.*, 2021). Gugus fungsi karboksil dan hidroksil yang terdapat pada permukaan bagase sorgum memfasilitasi mekanisme penyerapan logam (Shrestha *et al.*, 2016).

Menurut penelitian sebelumnya, penggunaan biosorben alami untuk penghilangan logam berat dinilai menunjukkan kinerja yang buruk karena memiliki kapasitas penyerapan yang rendah (Wan Ngah & Hanafiah, 2008). Oleh karena itu, perlu dilakukan perlakuan pada biosorben alami untuk meningkatkan kapasitas adsorpsi logam berat. Perlakuan pada biosorben alami dapat dilakukan secara fisik maupun kimia. Perlakuan secara fisik biasanya dianggap sederhana dan murah, namun metode ini tidak banyak digunakan karena memiliki efektivitas yang rendah. Sebaliknya perlakuan secara kimia lebih disukai karena operasinya sederhana dan juga efisien dalam meningkatkan selektivitas terhadap polutan logam berat yang ditargetkan (Mopoung & Kengkhetkit, 2016). Perlakuan secara kimia yang umum adalah perlakuan dengan asam atau alkali, pengikatan silang dengan EDTA, glutaraldehid, dan epiklorohidrin (Zaidi *et al.*, 2018). Perlakuan dengan alkali, khususnya menggunakan NaOH dapat menghilangkan pengotor pada permukaan adsorben, membuka situs aktif untuk adsorpsi logam, menghidrolisis dan deasetilasi pada bagian selulosa dalam biosorben. Proses ini dapat melarutkan hemiselulosa dan lignin dari dinding sel adsorben (Yan *et al.*, 2017).

Berdasarkan uraian di atas tujuan dari penelitian ini yaitu memanfaatkan limbah pertanian bagase sorgum yang diaktivasi dengan NaOH sebagai biosorben untuk penyisihan ion logam Cr(VI) dalam larutan. Mempelajari karakteristik untuk mengetahui sifat bagase sorgum yang diaktivasi dengan NaOH. Menganalisis parameter adsorpsi seperti pengaruh massa adsorben, waktu kontak, konsentrasi ion logam awal, pH optimum, dan suhu. Mempelajari perilaku, model isoterm, kinetika, dan termodinamika adsorpsi. Novelty pada penelitian ini adalah penggunaan limbah biomassa pertanian bagase sorgum yang diaktivasi dengan NaOH untuk adsorpsi ion logam Cr(VI).

2. Metode Penelitian

2.1 Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain bagase sorgum, natrium hidroksida (NaOH, pelet), asam klorida (HCl, cair), kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$, serbuk), asam sulfat (H_2SO_4 , cair), *1,5-diphenylcarbazide*

(serbuk), dan natrium klorida (NaCl, serbuk). Semua bahan kimia yang digunakan memiliki kemurnian pro analisis yang dibeli dari *Merck*. Pelarut umum yang digunakan adalah akuademin dan akuades. Semua bahan kimia yang digunakan tanpa proses pemurnian.

2.2 Preparasi Biomassa

Bagase sorgum diperoleh dari Pusat Penelitian Bioteknologi dan Kebun Percobaan Biologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Langkah awal adalah membersihkan bagase sorgum dengan mencucinya berulang kali menggunakan air mengalir untuk menghilangkan partikel debu dan kontaminan. Setelah bagase sorgum bersih, selanjutnya dikeringkan dalam oven selama 24 jam pada suhu 75 °C. Kemudian, bagase sorgum kering tersebut digiling dan disaring melalui ayakan dengan ukuran 40 *mesh*.

2.3 Aktivasi Biomassa

Bagase sorgum yang sudah diayak kemudian diaktivasi menggunakan larutan NaOH 0,04 M. Bagase sorgum sebanyak 12,5 gram direndam dalam 500 mL larutan NaOH 0,04 M lalu diaduk menggunakan *magnetic stirrer* selama 5 jam. Kemudian, padatan bagase sorgum disaring dan dibilas dengan air hingga mencapai pH yang netral. Bagase sorgum yang sudah netral kemudian dikeringkan di dalam oven selama 24 jam pada suhu 65 °C. Bagase sorgum yang sudah kering siap digunakan sebagai adsorben (Afandi *et al.*, 2023)

2.4 Penentuan Kondisi Optimum Adsorpsi

Penentuan kondisi optimum adsorpsi dilakukan dengan metode adsorpsi secara batch untuk menentukan kondisi kesetimbangan penyisihan Cr(VI) menggunakan adsorben BS-NaOH dengan parameter yang dipelajari meliputi variasi massa adsorben (50-1100 mg), waktu kontak adsorben (5-110 menit), konsentrasi awal Cr(VI) (5-100 mg/L), pH (2-9), dan suhu larutan (30-60 °C). Seluruh parameter optimasi dipelajari menggunakan 20 mL larutan Cr(VI) pada gelas beaker 50 mL, kemudian gelas beaker tersebut diaduk menggunakan *hotplate stirrer* dengan kecepatan 650 rpm. Metode mengikuti penelitian Afandi *et al.*, 2023 dengan modifikasi. Setelah proses adsorpsi, BS-NaOH dipisahkan dengan menggunakan kertas saring. Kandungan Cr(VI) yang masih ada diukur dengan menggunakan spektrofotometer UV-Vis pada panjang gelombang 542 nm. Sebelum dianalisis filtrat sampel ditambahkan dengan 1 mL larutan *1,5-diphenylcarbazide* 0,5% dan H₂SO₄ 2 M hingga terbentuk suasana asam pH 2 (Sathianarayanan *et al.*, 2021)

2.5 Karakterisasi Adsorben

2.4.1 FT-IR

Analisis menggunakan spektrofotometer *fourier transform-infrared* (FT-IR) bertujuan untuk mengetahui gugus fungsi yang terkandung dalam suatu sampel. Sampel yang dianalisis adalah adsorben bagase sorgum sebelum

aktivasi dan setelah aktivasi. Analisis FT-IR dilakukan dengan cara masing-masing sampel kering sebanyak 1 gram dipreparasi dengan 100 mg KBr menjadi pellet. Analisis FT-IR dilakukan pada rentang bilangan gelombang 4000-300 cm⁻¹. Karakterisasi sampel menggunakan alat FT-IR (Shimadzu).

2.4.2 SEM-EDX

Analisis menggunakan *scanning electron microscope-energy dispersive x-ray* (SEM-EDX) bertujuan untuk menganalisis morfologi, topografi, dan komposisi unsur dari suatu sampel padatan (Girão *et al.*, 2017). Analisis morfologi bertujuan untuk mengetahui bentuk serta ukuran permukaan adsorben bagase sorgum sesuai dengan perbesaran yang diinginkan. Analisis topografi berfungsi untuk mengetahui bagian permukaan dan tekstur dari adsorben tersebut. Analisis komposisi unsur bertujuan untuk mengetahui persentase berat dan persentase atom yang terkandung pada adsorben bagase sorgum. Karakterisasi sampel menggunakan alat SEM-EDX (Thermo Fisher Scientific).

2.4.3 XRD

Analisis difraksi sinar-X (XRD) digunakan untuk menentukan tingkat kristalinitas dalam sampel padatan. Pada analisis ini, digunakan sinar Cu K α ($\lambda = 1,54060$) dengan kisaran sudut 2θ antara 10-60°. Sampel yang diuji termasuk adsorben bagase sorgum sebelum aktivasi, setelah aktivasi, dan setelah proses adsorpsi larutan logam. Dalam proses analisis XRD, masing-masing sampel kering seberat 1 gram ditempatkan pada plat aluminium dengan perekat dan kemudian diekspos pada sinar-X menggunakan difraktometer. Radiasi yang dihasilkan kemudian di-deteksi oleh alat detektor dan diinterpretasikan sebagai spektrum difraksi sinar-X yang kemudian diperlihatkan dalam bentuk grafik difraktogram. Karakterisasi sampel menggunakan alat XRD (PANanalytical, X'Pert PRO).

2.4.4 BET-BJH

Analisis *Brunauer-Emmet-Teller Barrett-Joyner-Halenda* (BET-BJH) bertujuan untuk menentukan luas permukaan, ukuran, serta volume pori-pori suatu sampel padatan menggunakan alat autosorb 6. Sampel yang digunakan yaitu adsorben bagase sorgum sebelum dan sesudah aktivasi dengan NaOH. Prinsip kerja metode BET berdasarkan pada proses penyerapan gas N₂ oleh sampel padatan berpori. Sampel yang akan diuji ditempatkan dalam tabung dengan volume yang diketahui dan dipanaskan di bawah kondisi vakum dengan tekanan sekitar 10⁻² Torr untuk menghilangkan gas-gas yang ada dalam sampel. Tekanan ini menciptakan kondisi setengah vakum. Kemudian, tabung didinginkan dengan cairan nitrogen, dan sejumlah gas nitrogen diinjeksikan ke dalam tabung. Setelah mencapai kesetimbangan tekanan dalam tabung, tekanan diukur. Proses ini diulang beberapa kali dengan jumlah gas N₂ yang berbeda. Dengan memperhatikan perbedaan antara tekanan gas yang diinjeksikan dan tekanan yang diukur

setelah setiap penambahan, jumlah N_2 yang teradsorb di dalam sampel dapat dihitung. Karakterisasi sampel menggunakan alat (Quantachrome Instruments).

2.4.5 Uji karakteristik menggunakan metode pH_{pzc} (point of zero charge)

Untuk melakukan analisis pH_{pzc} , langkah awal adalah menyiapkan adsorben BS-NaOH. Selanjutnya, larutan NaCl dengan konsentrasi 0,01 M sebanyak 100 mL dimasukkan ke dalam Erlenmeyer. pH larutan disesuaikan dengan berbagai nilai pH antara 2-12 menggunakan larutan HCl 0,1 M dan NaOH 0,1 M. Setelah pH larutan sesuai, 1 g adsorben BS-NaOH ditambahkan ke dalam larutan tersebut. Kemudian, Erlenmeyer diaduk dengan shaker selama 24 jam pada suhu ruangan. Larutan hasil proses ini kemudian disaring dengan kertas saring, dan pH larutan diukur menggunakan pH meter setelah proses pengadukan. Untuk menemukan titik pH_{pzc} , grafik dibuat dengan pH awal sebagai sumbu x dan ΔpH sebagai sumbu y. Titik perpotongan garis dengan sumbu x pada nilai 0 dianggap sebagai pH_{pzc} (Weißpflug *et al.*, 2021).

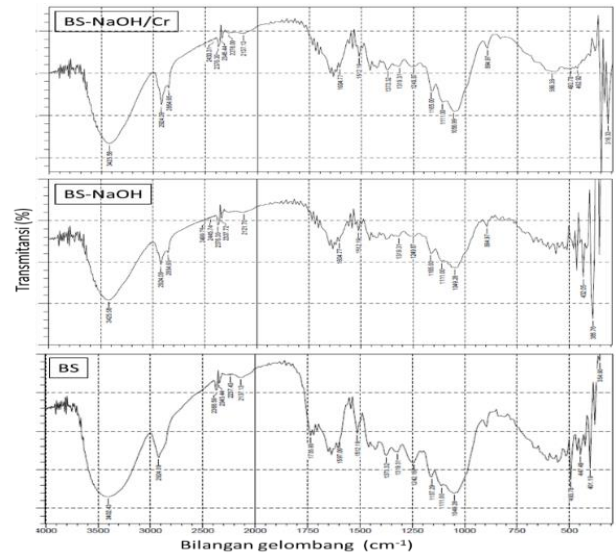
3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakterisasi Adsorben

3.1.1 FT-IR

Spektra IR dari BS sebelum dan setelah aktivasi dengan NaOH serta setelah adsorpsi Cr(VI) ditampilkan pada Gambar 1. Pada penelitian ini sampel dianalisis menggunakan FT-IR pada kisaran bilangan gelombang 4000-300 cm^{-1} .

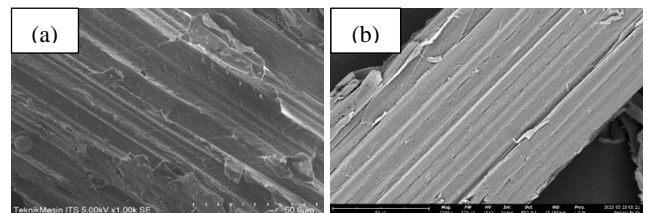
Hasil spektra IR pada Gambar 1 sampel BS dibandingkan dengan spektra IR sampel lainnya menunjukkan puncak bilangan gelombang pada 1735 cm^{-1} yang mengindikasikan vibrasi peregangan C=O dari ester menghilang dan pada 1242 cm^{-1} yang mengindikasikan vibrasi peregangan C-O pada gugus karboksil (-COOH) memiliki intensitas yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena dengan penambahan larutan NaOH dapat menghilangkan sebagian ikatan ester pada hemiselulosa dan ikatan eter pada lignin dari BS melalui penyabunan ikatan ester (Jalil *et al.*, 2020). Pada sampel BS terdapat puncak yang kuat dan lebar pada bilangan gelombang 3402 cm^{-1} yang mengindikasikan vibrasi regangan -OH karena adanya pektin, hemiselulosa, selulosa, lignin, dan air yang diserap. Terdapatnya puncak bilangan gelombang 2924 cm^{-1} pada semua sampel mengindikasikan vibrasi regangan C-H karena adanya gugus metoksi, metil, dan metilen (Gupta *et al.*, 2018). Pada sampel BS terdapat puncak bilangan gelombang 1597 cm^{-1} berhubungan dengan vibrasi -COO- gugus asam karboksilat dan pada 1049 cm^{-1} yang mengindikasikan vibrasi regangan C-O dari eter dan alkohol.



Gambar 1. Spektra FT-IR dari BS, BS-NaOH, dan BS-NaOH/Cr

3.1.2 SEM-EDX

Untuk mengetahui morfologi dan komposisi kandungan pada adsorben, maka dilakukan pengujian karakterisasi menggunakan SEM-EDX. Hasil pengujian SEM adsorben BS-NaOH sebelum dan sesudah adsorpsi ion Cr(VI) ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Morfologi adsorben hasil SEM-EDX (a) BS-NaOH, (b) BS-NaOH/Cr

Pada Gambar 2a merupakan morfologi BS-NaOH, gambar tersebut menunjukkan bahwa adsorben BS-NaOH terdiri dari serat yang ditunjukkan melalui garis sejajar dan bagian inti pada lembaran. Pada Gambar 2b merupakan morfologi BS-NaOH setelah proses adsorpsi ion Cr(VI). Pada gambar dapat diketahui bahwa serat pada adsorben BS-NaOH setelah adsorpsi ion Cr(VI) terlihat menjadi lebih halus, hal ini terjadi karena pada permukaan adsorben BS-NaOH terjadi pelapisan oleh ion kromat ($(CrO_4)^{2-}$).

Kandungan unsur-unsur dalam adsorben dapat diketahui melalui data hasil analisis *Energy Dispersive X-ray* (EDX). Setiap unsur memiliki spektrum emisi elektromagnetik yang berbeda, sehingga melalui karakterisasi menggunakan EDX dapat diketahui komposisi sebaran unsur pada adsorben. Hasil analisis unsur menggunakan karakterisasi EDX dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil analisis unsur menggunakan EDX

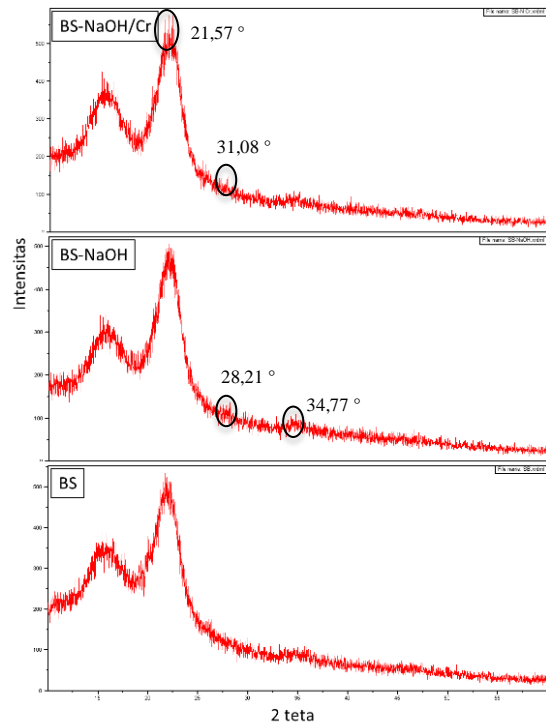
| Sampel | % Berat | | | | | |
|----------------|---------|-------|------|------|------|------|
| | C | O | Na | Si | Fe | Cr |
| BS- NaOH | 28,55 | 66,97 | 1,96 | 0,67 | 1,86 | - |
| BS- NaOH/Cr | 44,24 | 45,15 | 0,50 | 2,90 | 2,40 | 1,80 |

Tabel 1 menunjukkan hasil analisis unsur pada adsorben menggunakan EDX sebelum dan sesudah mengadsorpsi logam kromium. Hasil analisis EDX menunjukkan bahwa persentase unsur karbon meningkat setelah adsorpsi ion Cr(VI). Hal ini terjadi karena setelah proses adsorpsi ion Cr(VI) situs-situs penyerapan logam pada adsorben telah mengalami kejenuhan seiring dengan meningkatnya konsentrasi ion logam (Cherono *et al.*, 2021). Hasil analisis EDX menunjukkan adanya persentase unsur kromium pada adsorben BS-NaOH setelah adsorpsi ion Cr(VI). Hal ini membuktikan bahwa adsorben BS-NaOH telah mengikat unsur kromium.

3.1.3 XRD

Analisis karakterisasi dengan menggunakan teknik difraksi sinar-X (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi tingkat kristalinitas atau fase kristalin dari adsorben BS, BS-NaOH, serta BS-NaOH setelah adsorpsi ion Cr(VI). Analisis menggunakan XRD bertujuan untuk mengetahui nilai 2θ serta intensitas dari adsorben. Difraktogram hasil analisis XRD pada sampel dapat dilihat pada Gambar 3. Dari Gambar 3 dapat diketahui bahwa hasil spektra XRD pada ketiga sampel tidak ada puncak yang tajam. Hal ini membuktikan bahwa adsorben memiliki struktur amorf (Das *et al.*, 2015). Beberapa puncak muncul pada sampel BS teraktivasi NaOH, yaitu pada nilai $2\theta = 28,21^\circ$ dan $2\theta = 34,77^\circ$ dapat dikaitkan dengan keberadaan natrium (Na) (Mariana *et al.*, 2021). Puncak yang muncul memiliki intensitas yang tidak tinggi, di mana puncak ini mengindikasikan bahwa kristal natrium relatif kecil. Hal ini selaras dengan proses aktivasi adsorben BS yang hanya menggunakan larutan NaOH dengan konsentrasi 0,04 M.

Terjadi pergeseran dan munculnya beberapa puncak pada adsorben BS setelah adsorpsi logam kromium. Pergeseran, pembentukan, dan hilangnya puncak pada hasil difraktogram XRD adsorben BS-NaOH setelah adsorpsi ion Cr(VI) disebabkan oleh reaksi kimia yang terlibat selama proses adsorpsi (Hanumantu, 2021). Difraksi menonjol dari hasil analisis XRD BS-NaOH/Cr pada $21,57^\circ$ dan $31,08^\circ$ merupakan indikasi adanya ion kromium pada adsorben (Thangagiri *et al.*, 2022). Pola difraktogram dari ketiga sampel yang diamati menunjukkan tidak ada perubahan signifikan dalam struktur amorf dari adsorben BS-NaOH.



Gambar 3. Difraktogram hasil BS, BS-NaOH, dan BS-NaOH/Cr

3.1.4 BET-BJH

Analisis BET merupakan suatu metode yang digunakan untuk menentukan luas permukaan spesifik pada adsorben, sedangkan analisis BJH digunakan untuk menentukan ukuran serta volume pori adsorben. Hasil analisis karakterisasi adsorben menggunakan metode BET-BJH dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data permukaan dan porositas adsorben

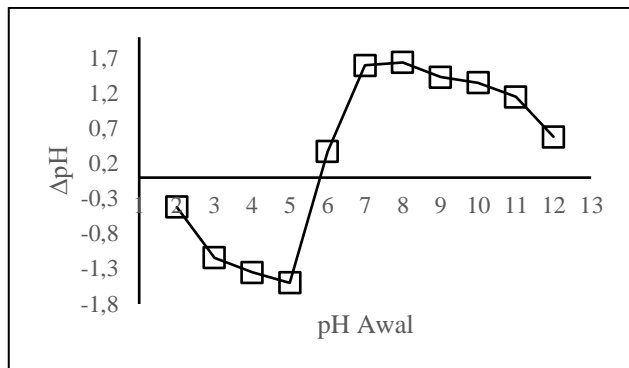
| Jenis Adsorben | Luas Permukaan (m^2/g) | Volume Total Pori (cm^3/g) | Ukuran Pori (nm) |
|----------------|----------------------------|--------------------------------|------------------|
| BS | 4,748 | 0,011 | 17,103 |
| BS-NaOH | 10,451 | 0,167 | 24,661 |

Tabel 2 menunjukkan bahwa setelah mengalami aktivasi dengan larutan NaOH, terjadi peningkatan pada luas permukaan, volume pori, dan ukuran pori dari adsorben. Hasil analisis BJH, sesuai dengan pedoman IUPAC (*International Union of Pure and Applied*) mengindikasikan bahwa adsorben BS-NaOH dapat diklasifikasikan sebagai adsorben dengan pori-pori berukuran mesopori.

3.1.5 Uji karakteristik menggunakan metode pH_{pzc} (point of zero charge)

Titik pH point of zero charge (pH_{pzc}) merupakan suatu keadaan di mana muatan permukaan adsorben sama dengan nol. Pada titik ini, permukaan adsorben bermuatan netral atau jumlah muatan kation dan anion pada permukaan suatu adsorben seimbang (Bernal *et al.*, 2017; Zarei *et al.*, 2018). Dalam penelitian ini, pH_{pzc} diubah-ubah dalam

rentang pH larutan 2-12. Ketika pH larutan berada antara 1-8, lebih disukai untuk menghilangkan anion, sementara jika pH larutan berada dalam kisaran 9-13, lebih disukai untuk menghilangkan kation (Samuel *et al.*, 2019). Hasil pengujian pH_{pzc} dari adsorben bagase sorgum teraktivasi NaOH (BS-NaOH) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik hasil analisis uji pH_{pzc}

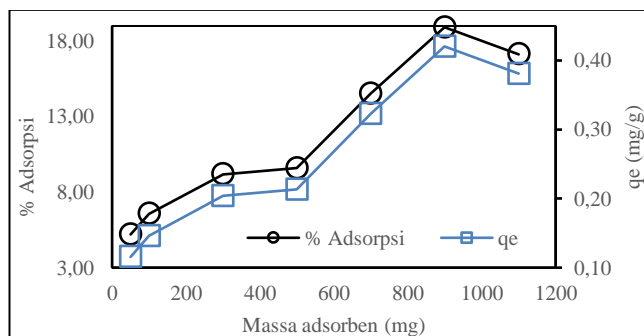
Dari Gambar 4 menunjukkan nilai pH_{pzc} adsorben BS-NaOH adalah 5,8. Hal ini berarti bahwa pada pH 5,8 permukaan adsorben BS-NaOH memiliki muatan netral, di bawah nilai pH_{pzc} permukaan adsorben BS-NaOH cenderung bermuatan positif sedangkan di atas nilai pH_{pzc} permukaan adsorben BS-NaOH cenderung bermuatan negatif (Bernal *et al.*, 2017).

3.2 Penentuan Kondisi Optimum Adsorpsi

3.2.1 Massa adsorben

Penentuan massa optimum adsorben dilakukan untuk mengetahui jumlah massa adsorben BS-NaOH yang memiliki efisiensi maksimum terhadap adsorpsi larutan ion logam Cr(VI). Penentuan massa optimum adsorben BS-NaOH dilakukan secara *batch* dengan variasi massa adsorben 50-1100 mg. Masing-masing variasi massa adsorben dimasukkan ke dalam beberapa *beaker glass* yang berisi 20 mL larutan ion logam Cr(VI) 100 ppm. *Beaker glass* kemudian diaduk pada suhu ruang selama 30 menit. Selanjutnya larutan disaring dan filtrat yang diperoleh ditambahkan dengan 1 mL larutan 1,5-diphenylcarbazine 0,5% dan H_2SO_4 2 M hingga terbentuk pH 2. Larutan akan terbentuk berwarna magenta, selanjutnya dianalisis hasil adsorpsi menggunakan metode spektrofotometri UV-Vis pada panjang gelombang 542 nm. Hasil optimasi variasi massa adsorben dapat dilihat pada Gambar 5.

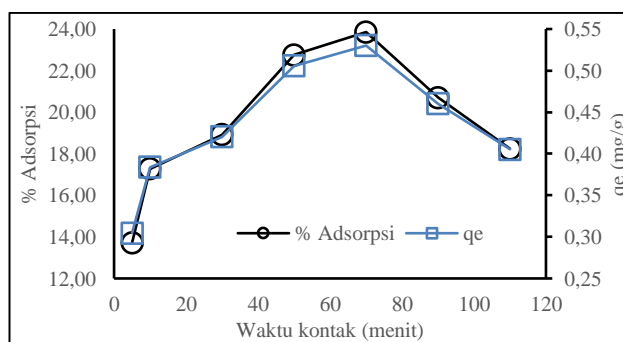
Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa persentase tertinggi adsorpsi ion logam Cr(VI) dilakukan dengan variasi massa adsorben 900 mg. Pada variasi massa adsorben menunjukkan adanya penurunan persentase adsorpsi ion logam Cr(VI) pada variasi massa 1100 mg. Hal ini terjadi karena saat penambahan massa adsorben yang terlalu banyak dapat menyebabkan kejenuhan pada situs adsorpsi di permukaan adsorben.



Gambar 5. Grafik optimasi variasi massa adsorben

3.2.2 Waktu kontak adsorben

Penentuan waktu kontak optimum dilakukan untuk mengetahui lamanya waktu yang dibutuhkan dalam proses adsorpsi larutan ion logam Cr(VI) agar memiliki efisiensi adsorpsi secara maksimum. Variasi waktu kontak yang digunakan yaitu 5-110 menit. Hasil optimasi variasi waktu kontak dapat dilihat pada Gambar 6.

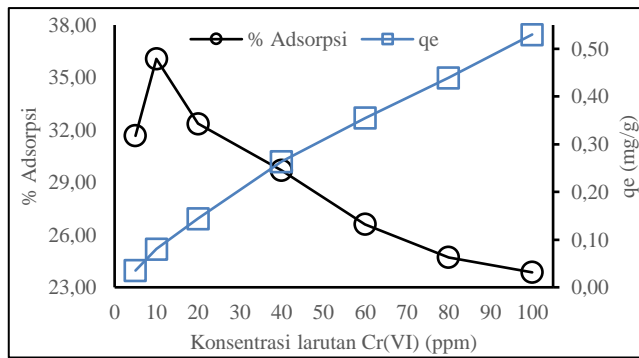


Gambar 6. Grafik optimasi variasi waktu kontak

Berdasarkan Gambar 6 dapat diketahui bahwa persentase tertinggi adsorpsi ion logam Cr(VI) dilakukan selama 70 menit. Pada waktu kontak 90 menit persentase dan kapasitas adsorpsi mengalami penurunan. Penurunan persentase dan kapasitas adsorpsi terus terjadi seiring dengan penambahan waktu kontak. Hal ini terjadi karena adsorben mengalami kejenuhan. Terbatasnya kapasitas adsorpsi logam kromium, sehingga setelah melewati waktu kontak optimum adsorben dapat mengalami kejenuhan oleh molekul ion logam Cr(VI) (Gorzin & Abadi, 2017; Panda *et al.*, 2017).

3.2.3 Konsentrasi larutan awal ion logam Cr(VI)

Penentuan konsentrasi larutan awal optimum dilakukan untuk mengetahui jumlah konsentrasi larutan ion logam Cr(VI) yang memiliki efisiensi maksimum dalam proses adsorpsi ion logam Cr(VI). Variasi konsentrasi larutan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 5-100 mg/L. Hasil optimasi variasi larutan awal ion logam Cr(VI) dapat dilihat pada Gambar 7.

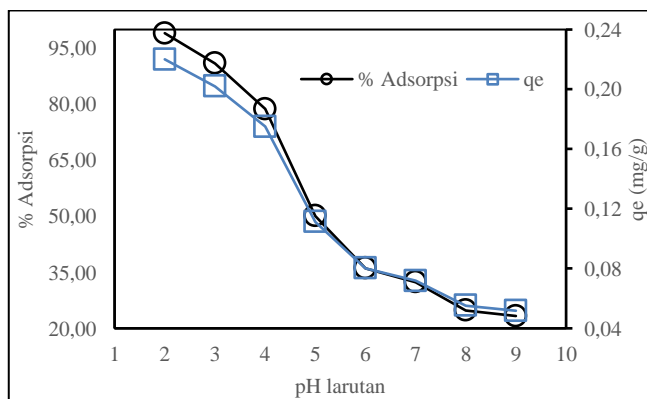


Gambar 7. Grafik optimasi variasi konsentrasi larutan awal ion Cr(VI)

Gambar 7 menunjukkan bahwa konsentrasi larutan awal ion logam Cr(VI) optimum sebesar 10 ppm. Gambar 7 juga menunjukkan terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi seiring dengan meningkatnya konsentrasi larutan awal ion logam Cr(VI). Hal ini terjadi karena pada konsentrasi larutan yang lebih tinggi terdapat banyak ion logam Cr(VI) yang dapat diadsorpsi oleh adsorben BS-NaOH, sehingga menghasilkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi. Namun, dengan meningkatnya konsentrasi larutan, luas permukaan adsorben BS-NaOH yang tersedia menjadi jenuh dengan ion logam Cr(VI) yang telah teradsorpsi, sehingga menyebabkan penurunan persentase adsorpsinya (Islam *et al.*, 2023).

3.2.4 pH optimum

Pengaruh pH larutan dalam proses adsorpsi logam kromium merupakan salah satu faktor penting. Hal ini dapat mengubah muatan permukaan adsorben, tingkat ionisasi, dan spesifikasi ion logam Cr(VI) (Labied *et al.*, 2018). Penentuan pH optimum dilakukan untuk mengetahui pH larutan ion logam Cr(VI) yang memiliki efisiensi adsorpsi maksimum. Variasi pH yang digunakan adalah pH 2-6 sebagai penanda kondisi asam pada larutan, pH 7 sebagai penanda kondisi netral, serta pH 8 dan 9 sebagai penanda kondisi basa pada larutan. Hasil optimasi variasi pH larutan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik optimasi variasi pH larutan ion Cr(VI)

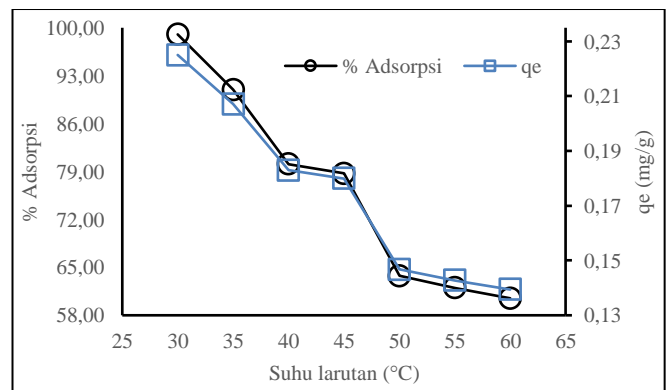
Berdasarkan Gambar 8 menunjukkan persentase adsorpsi dan kapasitas adsorpsi paling tinggi terjadi pada pH

2. Selanjutnya terjadi penurunan persentase adsorpsi dan kapasitas adsorpsi seiring dengan kenaikan nilai pH larutan. Hal ini dapat dijelaskan dengan hasil pengujian dari penentuan nilai pH_{pzc} yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Dari Gambar 4 diperoleh nilai pH_{pzc} pada penelitian yaitu 5,8. Permukaan adsorben BS-NaOH akan bermuatan positif jika pH larutan lebih rendah dari pada nilai pH_{pzc} sedangkan adsorben akan bermuatan negatif jika pH larutan lebih tinggi dari pada nilai pH_{pzc} . Pada pH 2 ion Cr(VI) akan terbentuk sebagai $Cr_2O_7^{2-}$, di mana dalam kondisi ini anion kromium dapat teradsorpsi oleh daya tarik elektrostatis yang kuat ketika pH larutan $< pH_{pzc}$. Ketika pH larutan $> pH_{pzc}$ konsentrasi ion OH⁻ akan meningkat dan mengakibatkan permukaan adsorben BS-NaOH bermuatan negatif yang berakibat pada terjadinya tolakan elektrostatis antara anionik Cr(VI) dengan muatan permukaan adsorben (Pant *et al.*, 2022).

3.2.5 Suhu larutan optimum

Variasi suhu larutan ion logam Cr(VI) yang digunakan yaitu 30-60 °C. Hasil optimasi variasi pH larutan dapat dilihat pada Gambar 9. Dapat diketahui bahwa adsorpsi logam Cr(VI) optimum pada suhu larutan 30 °C. Gambar 9 juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan persentase adsorpsi seiring dengan meningkatnya suhu larutan. Hal ini terjadi karena pada suhu larutan yang lebih tinggi interaksi elektrostatis antara ion logam dengan adsorben menjadi lebih lemah (Siuki *et al.*, 2021).



Gambar 9. Grafik optimasi variasi suhu larutan

3.3 Model Isoterm Adsorpsi

Penentuan model isoterm adsorpsi ion logam Cr(VI) dilakukan pada kondisi optimum adsorpsi yaitu waktu kontak 70 menit, pada pH larutan adalah 2 dan suhu 30 °C, dengan massa adsorben yang digunakan adalah 900 mg. Konsentrasi larutan ion logam Cd(II) yang digunakan adalah 5, 10, 20, 40, 60, 80, dan 100 ppm. Model isoterm adsorpsi yang dievaluasi pada penelitian ini yaitu Langmuir, Freundlich, Temkin, dan Dubinin-Radushkevich (D-R). Hasil analisis model isoterm adsorpsi ion logam Cr(VI) menggunakan adsorben BS-NaOH dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data analisis model isoterm adsorpsi

| Isoterm | Parameter | Nilai |
|------------|----------------------------|--|
| Langmuir | Q_{max} (mg/g) | 1,221 mg/g |
| | K_L | 0,010 L/mg |
| | R^2 | 0,93164 |
| Freundlich | K_F | 0,015 mg/g |
| | $1/n$ | 0,839 |
| | n | 1,191 |
| | R^2 | 0,98912 |
| Temkin | K_T | 0,938 L/g |
| | b_T | 34174,767 J/mol |
| | R^2 | 0,76056 |
| | Dubinin-Radushkevich (D-R) | q_m |
| | K_{D-R} | 0,000000575 mol ² /J ² |
| | E | 1,270 J/mol |
| | R^2 | 0,79877 |

Pada Tabel 3 dapat dilihat kelinieritasan dari nilai koefisien determinasi (R^2) pada model isoterm Freundlich lebih mendekati 1 dibandingkan dengan model isoterm lainnya. Hal ini membuktikan bahwa adsorpsi ion logam Cr(VI) menggunakan adsorben BS-NaOH mengikuti model isoterm Freundlich, di mana mekanisme adsorpsi pada permukaan BS-NaOH bersifat heterogen dengan adsorpsi *multilayer*. Permukaan adsorben memiliki sifat heterogen untuk mengadsorpsi banyak adsorbat (ion logam Cr(VI)) pada masing-masing molekul adsorben (Nkutha *et al.*, 2021). Model isoterm Freundlich mengasumsikan bahwa pada proses adsorpsi terjadi distribusi meningkat seiring dengan meningkatnya konsentrasi dari adsorbat (Badessa *et al.*, 2020). Hasil analisis model isoterm Freundlich menunjukkan nilai faktor heterogenitas ($1/n$) sebesar 0,839. Di mana nilai faktor heterogenitas < 1 menunjukkan proses adsorpsi yang terjadi bersifat menguntungkan (Adebayo *et al.*, 2020).

3.4 Model Kinetika Adsorpsi

Penentuan model kinetika adsorpsi ion logam Cr(VI) dilakukan pada kondisi optimum adsorpsi yaitu konsentrasi larutan 10 ppm pada pH 2 dan suhu 30 °C, dengan massa adsorben yang digunakan adalah 900 mg. Variasi waktu kontak yang digunakan adalah 5, 10, 30, 50, 70, 90, dan 110 menit. Permodelan kinetika adsorpsi yang biasa digunakan Pseudo orde pertama dan orde kedua (Tovbin, 2017), difusi intrapartikel, dan model Elovich. Hasil analisis model kinetika adsorpsi ion logam Cr(VI) menggunakan adsorben BS-NaOH dapat dilihat pada Tabel 4.

Dalam Tabel 4, terlihat bahwa adsorpsi ion logam Cr(VI) menggunakan adsorben BS-NaOH paling cocok dengan model kinetika adsorpsi pseudo orde kedua. Kevalidan ini terbukti dari nilai koefisien determinasi (R^2) yang mendekati 1 dalam konteks model kinetika pseudo orde kedua. Model kinetika pseudo orde kedua menjelaskan bahwa laju penyerapan oleh adsorben per unit waktu berkorelasi langsung dengan kapasitas adsorben. Maka, pada tahap awal proses adsorpsi, terjadi penurunan signifikan dalam konsentrasi larutan, yang kemudian mengalami penurunan laju adsorpsi hingga mencapai kondisi kesetimbangan. (Revellame *et al.*, 2020). Model

kinetika adsorpsi logam Cr(VI) lebih baik didukung oleh model kinetika Elovich dibandingkan dengan model difusi intra partikel yang dibuktikan dengan nilai koefisien determinasi (R^2).

Tabel 4. Data analisis model kinetika adsorpsi

| Model | Parameter | Nilai | |
|-----------------------|---------------------|--|-------------------------|
| Kinetika | | | |
| | Pseudo Orde Pertama | K_1 | 0,014 min ⁻¹ |
| | | q_e | 0,104 mg/g |
| | R^2 | 0,09183 | |
| Pseudo Orde Kedua | K_2 | 2,019 mg ⁻¹ min ⁻¹ | |
| | q_e | 0,440 mg/g | |
| | R^2 | 0,97075 | |
| Difusi Intra Partikel | K_{dif} | 0,016 mg g ⁻¹ min ^{-0.5} | |
| | C | 0,327 mg g ⁻¹ | |
| | R^2 | 0,40729 | |
| Elovich | α | 20,475 mg g ⁻¹ min ⁻¹ | |
| | β | 0,063 g/mg | |
| | R^2 | 0,55403 | |

3.5 Termodinamika Adsorpsi

Termodinamika adsorpsi bertujuan untuk memahami perilaku dari mekanisme adsorpsi, memprediksi kapasitas adsorpsi, serta mengoptimalkan bahan adsorben. Perhitungan ini melibatkan penentuan sifat termodinamika seperti entalpi isosterik adsorpsi, kapasitas panas isothermal dan adiabatik, dan konstanta kesetimbangan.

Termodinamika adsorpsi ion Cr(VI) dihitung pada kondisi optimum adsorpsi yaitu massa adsorben 900 mg, waktu kontak 70 menit, konsentrasi larutan 10 mg/L, dan pH larutan 2. Variasi suhu yang digunakan yaitu 303,15-333,15 K. Nilai $\ln K_d$ kemudian diplotkan terhadap $1/T$ sehingga diperoleh bentuk linier yang mengikuti persamaan *van't Hoff* sesuai dengan persamaan 1.

$$\ln K_d = \frac{\Delta S^\circ}{R} - \frac{\Delta H^\circ}{R \times T} \quad (1)$$

Nilai perubahan entalpi (ΔH°) dan entropi (ΔS°) pada adsorpsi ion logam Cd(II) menggunakan adsorben BS-NaOH masing-masing dihitung berdasarkan nilai slope dan intersep, sedangkan nilai perubahan energi bebas Gibbs (ΔG°) pada adsorpsi ion logam Cd(II) diperoleh menggunakan persamaan 2. Hasil perhitungan termodinamika adsorpsi dapat dilihat pada Tabel 5.

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - (T \times \Delta S^\circ) \quad (2)$$

Nilai parameter termodinamika adsorpsi ion logam Cr(VI) menggunakan adsorben BS-NaOH yang disajikan dalam Tabel 5 menunjukkan nilai ΔH° yang negatif. Hal ini menunjukkan bahwa adsorpsi ion logam Cr(VI) berlangsung secara eksotermis. Hal ini juga menjelaskan bahwa kapasitas serta persentase adsorpsi ion Cr(VI) menurun seiring dengan meningkatnya suhu larutan.

Nilai ΔG° yang semakin bernilai positif menunjukkan bahwa adsorpsi ion logam Cr(VI) berlangsung secara tidak spontan, reaksi adsorpsi akan berlangsung secara spontan apabila suhu larutan berada di bawah suhu 30 °C. Nilai absolut energi bebas Gibbs (ΔG°) < 40 kJ/mol menunjukkan bahwa proses adsorpsi ion Cr(VI) tidak hanya dikontrol oleh proses kemisorpsi tetapi juga oleh mekanisme

adsorpsi secara fisik. Nilai negatif dari perubahan entropi standar (ΔS°) menunjukkan bahwa adsorben BS-NaOH memiliki afinitas dan selektivitas yang tinggi untuk ion Cr(VI). Nilai negatif pada ΔS° juga menunjukkan bahwa terjadi penurunan tingkat gangguan pada antarmuka padat-cair (Neolaka *et al.*, 2020).

Tabel 5. Data nilai parameter termodinamika adsorpsi

| Suhu (K) | ΔG° (kJ/mol) | ΔH° (kJ/mol) | ΔS° (kJ/mol/K) |
|----------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 303,15 | 0,809 | | |
| 308,15 | 2,531 | | |
| 313,15 | 4,252 | | |
| 318,15 | 5,974 | -103,571 | -0,344 |
| 323,15 | 7,696 | | |
| 328,15 | 9,417 | | |
| 333,15 | 11,139 | | |

4. Kesimpulan

Kondisi optimum penyerapan ion logam Cr(VI) tercapai menggunakan massa adsorben sebanyak 900 mg dengan waktu kontak 70 menit, konsentrasi larutan awal 10 mg/L, pada pH 2 dan suhu larutan 30 °C, dengan kapasitas adsorpsi (Qads) dan persentase penyerapan maksimum adalah 0,53 mg/g dan 99,03%. Karakterisasi adsorben bagase sorgum sebelum dan setelah aktivasi dengan NaOH menunjukkan bahwa permukaan adsorben menjadi lebih halus, lebih perpori, dan memiliki luas permukaan serta ukuran pori yang lebih besar. Hasil pengujian pH_{pzc} pada adsorben BS-NaOH adalah sebesar 5,8. Adsorpsi ion logam Cr(VI) mengikuti model isoterm Freundlich dengan nilai faktor heterogenitas (1/n) menunjukkan adsorpsi yang menguntungkan. Proses adsorpsi ion Cr(VI) mengikuti hukum laju orde dua, di mana proses mekanisme adsorpsi adalah kemisorpsi yang didukung oleh model Elovich. Perilaku termodinamika adsorpsi menunjukkan bahwa proses adsorpsi ion Cr(VI) bersifat eksotermik. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa adsorben BS-NaOH dapat berfungsi sebagai adsorben yang menjanjikan untuk adsorpsi ion logam Cr(VI) dari larutan dengan efisiensi adsorpsi yang baik, penggunaannya yang relatif sederhana, dan bersifat ekonomis.

Daftar Pustaka

Adebayo, G.B., Adegoke, H.I., & Fauzeeyat, S. (2020). Adsorption of Cr(VI) ions onto goethite, activated carbon and their composite: kinetic and thermodynamic studies. *Applied Water Science*, 10(9), 213.

Afandi, A.Y., Kurniawan, Y.D., Widyaningrum, B.A., Matilda, T., Indriani, D.W., Putri, D.I.M., Darmokoesoemo, H., & Kusuma, H.S. (2023). Potentials of NaOH modified agricultural waste of sorghum bagasse for lead (II) removal from aqueous solution: kinetics, isotherm and thermodynamic studies. *Chemistry and Ecology*, 39(5), 506–524.

Ajitha, P., Vijayalakshmi, K., Saranya, M., Gomathi, T., Rani, K., Sudha, P. ., & Sukumaran, A. (2017). Removal of toxic heavy metal lead (II) using chitosan oligosaccharide-graft-maleic anhydride/polyvinyl alcohol/silk fibroin composite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 104, 1469–1482.

Ashraf, A., Bibi, I., Niazi, N.K., Ok, Y.S., Murtaza, G., Shahid, M., Kunhikrishnan, A., Li, D., & Mahmood, T. (2017). Chromium(VI) sorption efficiency of acid-activated banana peel over organo-montmorillonite in aqueous solutions. *International Journal of Phytoremediation*, 19(7), 605–613.

Badessa, T.S., Wakuma, E., & Yimer, A.M. (2020). Bio-sorption for effective removal of chromium(VI) from wastewater using Moringa stenopetala seed powder (MSSP) and banana peel powder (BPP). *BMC Chemistry*, 14(1), 71.

Bernal, V., Erto, A., Giraldo, L., & Moreno-Piraján, J.C. (2017). Effect of Solution pH on the Adsorption of Paracetamol on Chemically Modified Activated Carbons. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 22(7).

Cherono, F., Mburu, N., & Kakoi, B. (2021). Adsorption of lead, copper and zinc in a multi-metal aqueous solution by waste rubber tires for the design of single batch adsorber. *Heliyon*, 7(11), e08254.

Das, D., Samal, D., & BC, M. (2015). Preparation of Activated Carbon from Green Coconut Shell and its Characterization. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 06.

Deng, J., Liu, Y., Liu, S., Zeng, G., Tan, X., Huang, B., Tang, X., Wang, S., Hua, Q., & Yan, Z. (2017). Competitive adsorption of Pb(II), Cd(II) and Cu(II) onto chitosan-pyromellitic dianhydride modified biochar. *Journal of Colloid and Interface Science*, 506, 355–364.

Gorzin, F., & Abadi, M.M.B.R. (2017). Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution by adsorbent prepared from paper mill sludge: Kinetics and thermodynamics studies. *Adsorption Science & Technology*, 36(1–2), 149–169.

Gupta, M., Gupta, H., & Kharat, D.S. (2018). Adsorption of Cu(II) by low cost adsorbents and the cost analysis. *Environmental Technology & Innovation*, 10, 91–101.

Hanumantu, J.R. (2021). Characterization Studies on Adsorption of Lead and Cadmium Using Activated Carbon Prepared from Waste Tyres. *Nature Environment and Pollution Technology*, 20(2), 561–568.

Hauwa, H., Whong, C.M.Z., Ado, S.A., & Abdulmumin, A.N. (2020). Optimization of Culture Condition for Biosorption of Lead using *Pseudomonas aeruginosa* isolated from Gold Mining Site of Anka, Zamfara State. *UMYU Journal of Microbiology Research (UJMR)*, 5(1 SE-Articles), 43–48.

Islam, M.M., Mohana, A.A., Rahman, M.A., Rahman, M., Naidu, R., & Rahman, M.M. (2023). A Comprehensive Review of the Current Progress of Chromium Removal

- Methods from Aqueous Solution. *Toxics* 11, (3).
- Jalil, R., Mohd-Sahaid, K., Abd.Rahman, N., Aidil, A.H., & Farid, A. (2020). Effect of Sodium Hydroxide Pretreatment on Chemical Composition of Treated Acacia Mangium using Response Surface Methodology. *Journal of Tropical Forest Science*, 32, 391–401.
- Kamal, M., Hadi, M.S., Hariyanto, E., Jumarko, & Ashadi. (2014). Grain yield and, nutrient and starch content of Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) genotypes as affected by date of intercropping with Cassava in Lampung, Indonesia. *Journal of the International Society for Southeast Asian Agricultural Sciences*, 20, 64–76.
- Komari, N., Utami, U., & Malinda, N. (2012). Adsorpsi Pb^{2+} dan Zn^{2+} pada Biomassa Imperata cylindrica. *Jurnal Kimia VALENSI*, 2.
- Labied, R., Benturki, O., Eddine Hamitouche, A.Y., & Donnot, A. (2018). Adsorption of hexavalent chromium by activated carbon obtained from a waste lignocellulosic material (*Ziziphus jujuba* cores): Kinetic, equilibrium, and thermodynamic study. *Adsorption Science & Technology*, 36(3–4), 1066–1099.
- Lakkimsetty, N.R., & Prabhakar, G. (2011). Research Article Removal of Heavy Metals by Biosorption-An Overall Review. *Journal of Engineering Studies and Research*, 2, 17–22.
- Mariana, M., Mulana, F., Juniar, L., Fathira, D., Safitri, R., Muchtar, S., Bilad, M., Shariff, A., & Huda, N. (2021). Development of Biosorbent Derived from the Endocarp Waste of Gayo Coffee for Lead Removal in Liquid Wastewater—Effects of Chemical Activators. *Sustainability*, 13, 3050.
- Martins, R.P., Schmatz, A.A., de Freitas, L.A., Mutton, M.J.R., & Brienzo, M. (2021). Solubilization of hemicellulose and fermentable sugars from bagasse, stalks, and leaves of sweet sorghum. *Industrial Crops and Products*, 170, 113813.
- Mopoung, R., & Kengkhethkit, N. (2016). Lead and cadmium removal efficiency from aqueous solution by NaOH treated pineapple waste. *12*, 23–35.
- Neolaka, Y.A.B., Lawa, Y., Naat, J.N., Pau Riwu, A.A., Darmokoesoemo, H., Supriyanto, G., Holdsworth, C.I., Amenaghawon, A.N., & Kusuma, H.S. (2020). A Cr(VI)-imprinted-poly(4-VP-co-EGDMA) sorbent prepared using precipitation polymerization and its application for selective adsorptive removal and solid phase extraction of Cr(VI) ions from electroplating industrial wastewater. *Reactive and Functional Polymers*, 147, 104451.
- Nkutha, C.S., Naidoo, E.B., & Shooto, N.D. (2021). Adsorptive studies of toxic metal ions of Cr(VI) and Pb(II) from synthetic wastewater by pristine and calcined coral limestones. *South African Journal of Chemical Engineering*, 36, 43–57.
- Panda, H., Tiadi, N., Mohanty, M., & Mohanty, C.R. (2017). Studies on adsorption behavior of an industrial waste for removal of chromium from aqueous solution. *South African Journal of Chemical Engineering*, 23, 132–138.
- Pant, B.D., Neupane, D., Paudel, D.R., Chandra Lohani, P., Gautam, S.K., Pokhrel, M.R., & Poudel, B.R. (2022). Efficient biosorption of hexavalent chromium from water by modified arecanut leaf sheath. *Heliyon*, 8(4), e09283.
- Rakhunde, R., Deshpande, L., & Juneja, H.D. (2012). Chemical Speciation of Chromium in Water: A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(7), 776–810.
- Revellame, E.D., Fortela, D.L., Sharp, W., Hernandez, R., & Zappi, M.E. (2020). Adsorption kinetic modeling using pseudo-first order and pseudo-second order rate laws: A review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100032.
- Samuel, M.S., Bhattacharya, J., Raj, S., Santhanam, N., Singh, H., & Pradeep Singh, N.D. (2019). Efficient removal of Chromium(VI) from aqueous solution using chitosan grafted graphene oxide (CS-GO) nanocomposite. *International Journal of Biological Macromolecules*, 121, 285–292.
- Sathianarayanan, M.P., Nayak, R., & Hande, Y. (2021). Determination of Cr (VI) Content in Water-Soluble Dyes. *Journal of Chromatographic Science*, 59(1), 88–94.
- Shrestha, B., Kour, J., & Ghimire, K. (2016). Adsorptive Removal of Heavy Metals from Aqueous Solution with Environmental Friendly Material—Exhausted Tea Leaves. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 06, 525–540.
- Siuki, A.K., Shahidi, A., Taherian, P., & Zeraatkar, Z. (2021). Comparing natural and mineral adsorbents in removing chromium from aquatic environment. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(3), 2593–2601.
- Tahoon, M.A., Siddeeg, S.M., Salem Alsaiani, N., Mnif, W., & Ben Rebah, F. (2020). Effective Heavy Metals Removal from Water Using Nanomaterials: A Review. *Processes*, 8, (6).
- Thangagiri, B., Sakthivel, A., Jeyasubramanian, K., Seenivasan, S., Dhavethu Raja, J., & Yun, K. (2022). Removal of hexavalent chromium by biochar derived from *Azadirachta indica* leaves: Batch and column studies. *Chemosphere*, 286, 131598.
- Tovbin, Y. (2017). The Molecular Theory of Adsorption in Porous Solids. In *The Molecular Theory of Adsorption in Porous Solids*.
- Valentín-Reyes, J., García-Reyes, R.B., García-González, A., Soto-Regalado, E., & Cerino-Córdova, F. (2019). Adsorption mechanisms of hexavalent chromium from aqueous solutions on modified activated carbons. *Journal of Environmental Management*, 236, 815–822.
- Vijayaraghavan, K., & Balasubramanian, R. (2015). Is biosorption suitable for decontamination of metal-bearing wastewaters? A critical review on the state-of-the-art of biosorption processes and future directions. *Journal of Environmental Management*, 160, 283–296.
- Wan Ngah, W.S., & Hanafiah, M.A.K.M. (2008). Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically

- modified plant wastes as adsorbents: A review. *Bioresource Technology*, 99(10), 3935–3948.
- Weißpflog, J., Vehlow, D., Müller, M., Kohn, B., Scheler, U., Boye, S., & Schwarz, S. (2021). Characterization of chitosan with different degree of deacetylation and equal viscosity in dissolved and solid state – Insights by various complimentary methods. *International Journal of Biological Macromolecules*, 171, 242–261.
- Yan, T., Luo, X., Lin, X., & Yang, J. (2017). Preparation, characterization and adsorption properties for lead (II) of alkali-activated porous leather particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 512, 7–16.
- Zaidi, N.A.H.M., Lim, L.B.L., & Usman, A. (2018). Enhancing adsorption of Pb(II) from aqueous solution by NaOH and EDTA modified *Artocarpus odoratissimus* leaves. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(6), 7172–7184.
- Zarei, M., Djafarzadeh, N., & Khadir, L. (2018). Removal of direct blue 129 from aqueous medium using surfactant-modified zeolite: a neural network modeling. *Environmental Health Engineering and Management*, 5, 101–113.