

Available online at: <http://reactor.poltekattidg.ac.id/>

REACTOR

Journal of Research on Chemistry and Engineering

| ISSN Online 2746-0401 |



Karakterisasi Performa Adsorben Cangkang Telur Pada Proses Penyerapan Logam Merkuri (Hg)

Miftahurrahmah¹, Ellysa², Suhendrayatna³¹ Jurusan D3 Teknik Kimia Bahan Nabati, Politeknik ATI Padang, Jl. Tabing Bungo Pasang, Padang, 25171, Indonesia² Balai Standardisasi dan Pelayanan Jasa Industri Banda Aceh, Jl. Cut Nyak Dhien No.377, Banda Aceh, 23230, Indonesia³ Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala, Jl. Teuku Nyak Arief, Banda Aceh, 23111, Indonesia

ARTICLE INFORMATION

Received: June 10, 2024

Revised: June 30, 2024

Accepted: July 02, 2024

KEYWORDS

Adsorbent, Adsorption, Eggshell, Mercury, Wastewater Treatment

CORRESPONDENCE

Name: Miftahurrahmah

E-mail: miftahurrahmah@kemenperin.go.id

ABSTRACT

Mercury (Hg) is a highly toxic heavy metal with no biological benefits, posing significant environmental and health risks upon exposure. This study investigates the adsorption characteristics of chicken eggshell-derived adsorbents for the removal of Hg from aqueous solutions. The adsorbent preparation involved washing, drying, calcination, and KOH activation. Results indicated that the 170-mesh size adsorbent exhibited the highest adsorption efficiency, achieving a 99.70% removal rate of Hg. Adsorption capacity tests revealed values ranging from 79,90 to 88,90 mg/g, conforming to the Indonesian National Standard (SNI) for activated carbon. Functional group analysis using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) identified a significant increase in aldehyde and ketone groups post-activation. The adsorption process reached equilibrium within 90 minutes, with optimal removal efficiency observed at an initial Hg concentration of 3,0 mg/L. These findings suggest that chicken eggshell-based adsorbents are a cost-effective and efficient solution for mitigating Hg contamination in wastewater, offering a sustainable alternative to conventional methods.

PENDAHULUAN

Limbah cair dengan kandungan logam berat yang dibuang ke lingkungan perairan dapat membahayakan makhluk hidup di dalamnya dan berefek racun yang dapat mematikan [1]. Salah satu jenis logam berat berbahaya dan tidak esensial adalah logam berat Hg (merkuri), yang keberadaannya di dalam tubuh dapat membahayakan dan mempengaruhi kesehatan dalam jangka panjang [2]. Logam Hg banyak dijumpai di air sungai daerah aliran yang terhubung dengan lokasi penambangan emas. Penambangan emas skala kecil biasanya dilakukan dengan metode amalgamasi yaitu dengan menggunakan cairan merkuri pada proses pencucian tanah atau batuan yang mengandung emas sehingga emas dapat terpisah dari campuran lainnya. Metode ini dengan tegas dilarang oleh pemerintah setelah adanya UU No.11 tahun 2017 karena hingga saat ini kegiatan penambangan emas skala kecil menyumbang

lebih dari 50% total merkuri yang dibuang ke lingkungan [3]. Pada umumnya air limbah hasil pengolahan tersebut langsung dibuang ke sungai tanpa adanya uji kualitas air limbah pasca penambangan. Kandungan merkuri pada sumber air yang dikonsumsi oleh masyarakat akan sangat berdampak terhadap kesehatan masyarakat sekitar. Salah satu penyakit yang dapat ditimbulkan melalui rantai makanan dengan kandungan Hg yang tinggi adalah penyakit Minamata [4]. Oleh karena itu dibutuhkan penanganan serius untuk mereduksi kandungan logam berat, salah satunya dengan adsorpsi Hg.

Proses adsorpsi merupakan salah satu metode yang dapat dilakukan untuk menghilangkan kandungan logam berat berbahaya yang terkandung di dalam limbah cair. Proses ini menjadi alternatif yang sangat diminati karena kemampuannya dalam mereduksi kontaminasi logam berat pada air limbah yang cukup efisien dan efektif. Selain itu, juga tergolong ekonomis dan praktis karena

menggunakan bahan biomaterial yang murah serta dapat dipakai kembali setelah melalui tahapan regenerasi [5]

Proses adsorpsi dapat dilakukan menggunakan adsorben dengan bahan dasar yang murah dan mudah didapat untuk menghilangkan kandungan logam berat dalam air limbah[6]. Pada prinsipnya, semua bahan berpori dapat digunakan sebagai adsorben, seperti batu bara[7], silika gel[8], *fly ash* dan zeolit[6]. Beberapa bahan yang dapat digunakan untuk dijadikan adsorben di antaranya; kulit jeruk[9], kulit pisang[10], kulit buah sukun[11] cangkang telur [5], [12], serabut kelapa[1], dan lain sebagainya. Sebelumnya, Peneliti telah melakukan proses adsorpsi logam berat menggunakan eceng gondok dan sekam padi [13], sehingga penelitian ini terus dilanjutkan untuk meningkatkan data mengenai kapasitas penyerapan dari limbah lainnya. Pada penelitian ini dipelajari performa adsorpsi cangkang telur sebagai adsorben cemaran merkuri. Hal ini dilakukan karena beberapa peneliti terdahulu telah menyampaikan bahwa cangkang telur berpotensi untuk dijadikan adsorben sebagai penyerap cadmium[5], dan juga digunakan pemurnian gliserol [12].

Pemilihan adsorben cangkang telur ayam karena merupakan limbah organik yang mudah didapat, harga yang relatif murah dan tidak berbahaya serta mempunyai struktur dengan pori-pori alami sebanyak 10.000-20.000, sehingga dikategorikan dapat menyerap *solute*. Selain itu, cangkang telur mengandung kalsium karbonat yang sangat tinggi, mencapai hingga 98,41% yang menunjukkan bahwa adsorben ini tergolong ke dalam adsorben polar.

Proses aktivasi diperlukan untuk meningkatkan kemampuan adsorpsi dari suatu adsorben. Adsorben tanpa aktivasi sebelumnya terkadang kurang efektif dalam menyisihkan logam berat. Aktivasi bertujuan untuk memperbesar pori-pori adsorben dengan memecah ikatan hidrokarbon atau mengoksidasi permukaan molekul, sehingga luas permukaan adsorben meningkat dan mempengaruhi daya adsorpsinya. Aktivasi dapat dilakukan secara fisik, seperti pemanasan dan pendidihan dengan air, atau secara kimia, seperti pencucian dengan asam, basa, alkohol, atau kombinasinya [10]

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan karakteristik adsorben cangkang telur ayam dan menguji kinerja adsorben cangkang telur ayam terhadap penyisihan larutan Hg.

METODOLOGI

Pembuatan Adsorben

Proses pembuatan adsorben cangkang telur ayam dimulai dari pencucian cangkang telur ayam, selanjutnya dikeringkan pada suhu 100°C selama 4 jam, kemudian dikalsinasi (pengarangan) menggunakan *furnace* pada suhu 400°C selama 30 menit. Setelah didinginkan kemudian dihaluskan dengan menggunakan *milling* dan diayakan dengan ukuran 100 dan 170 mesh, ukuran ini dipilih untuk dapat melihat perbedaan daya serap pada beberapa ukuran adsorben. Adsorben yang berukuran 170 mesh sebagian digiling menggunakan *ball mill* selama 10 jam hingga berukuran nano. Proses aktivasi dilakukan dengan cara dimasukkan arang cangkang telur ayam ke dalam larutan KOH 10% sebagai *activating agent* dengan rasio perbandingan 1:4 dan diaduk dengan kecepatan 100 rpm selama 1 jam, lalu dicuci dengan aquadest pada suhu 85°C sampai nilai pH air hasil saringan menjadi netral. Adsorben cangkang telur ayam yang telah dicuci, dikeringkan kembali pada suhu 110°C selama 24 jam sehingga menjadi produk adsorben yang siap digunakan[12].

Karakterisasi

Uji daya serap iodine dilakukan untuk mengetahui kemampuan/kapasitas penyerapan dari adsorben cangkang telur ayam, sementara uji gugus fungsi dilakukan untuk mengetahui struktur molekul yang menunjukkan karakteristik reaksi kimia dan menentukan sifat zat dari adsorben cangkang telur ayam.

Persiapan Larutan Hg

Larutan standar Hg yang telah tersedia dengan konsentrasi 1000 mg/L diencerkan menjadi 1, 2, 3, 4, 5 dan 6 mg/L menggunakan aquadest.

Uji Adsorpsi

Uji adsorpsi dilakukan dengan mode operasi *batch* menggunakan *beaker glass* 250 ml dengan mengontakkan adsorben cangkang telur ayam dengan larutan Hg dengan rasio perbandingan 1:100. Campuran diaduk dengan kecepatan 100 rpm selama 30, 60, 90, 120 dan 150 menit. Konsentrasi Hg dalam campuran hasil adsorpsi kemudian diuji nilainya dengan menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) untuk mengetahui persentase penyisihan yang dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\% \text{ Penyisihan} = (C_0 - C_t) / C_0 \quad (1)$$

Keterangan:

C_0 = konsentrasi C waktu 0

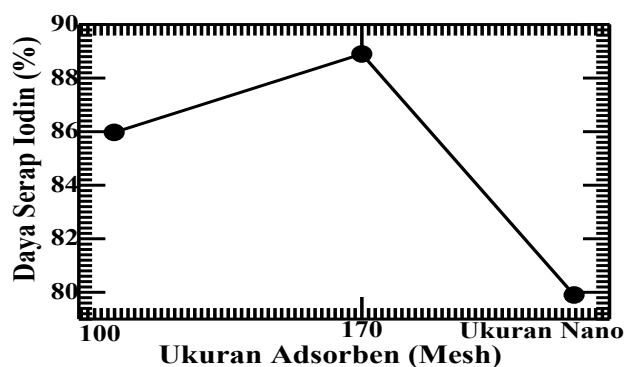
C_t = konsentrasi C waktu tertentu

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Daya Serap Iodin

Kemampuan adsorben cangkang telur ayam dalam menyerap iodin berkisar dari 79,90 – 88,90 mg/g. Nilai tersebut di bawah baku mutu SNI arang aktif 06-3730-1995[14] yaitu min. 750 mg/g. Konsentrasi daya serap iodin oleh adsorben cangkang telur ayam dapat dilihat pada Gambar 1. Adsorben cangkang telur ayam dengan ukuran 170 mesh mempunyai nilai efisiensi penyisihan logam Hg tertinggi yaitu sebesar 99,2229 %, sehingga dapat disimpulkan bahwa adsorben cangkang telur ayam terbaik adalah ukuran 170 mesh. Hal ini terjadi karena pada ukuran 170 mesh, luas permukaan yang dihasilkan lebih besar dibandingkan 100 mesh dan rongga pori yang dihasilkan masih kecil sehingga molekul iodin yang berukuran kurang dari 1 nm masih dapat masuk ke dalam pori-pori adsorben tersebut.

Sedangkan pada adsorben yang berukuran nano, daya serap iodinnya turun dengan cukup drastis, hal ini terjadi akibat luas permukaannya sudah sangat besar, sehingga ukuran pori-pori adsorben lebih besar dibandingkan molekul iodin. Hal ini menyebabkan tidak dapat melekat molekul iodin pada pori-pori permukaan adsorben.

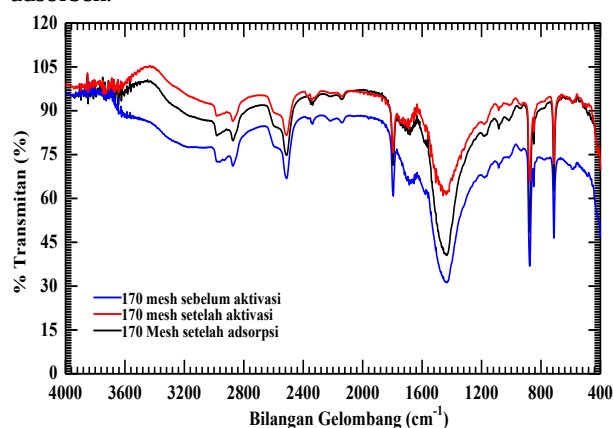


Gambar 1. Konsentrasi Daya Serap Iodin pada Adsorben Cangkang Telur Ayam

Analisis Gugus Fungsi

Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi kualitas dan menentukan gugus fungsi dari adsorben cangkang telur ayam. Hasil analisis gugus fungsi disajikan pada Gambar 2. Analisis gugus fungsi dari adsorben cangkang telur ayam menggunakan alat FT-IR (*Fourier Transmittan infrared spectroscopy*) pada range 500 cm^{-1} sampai 4000 cm^{-1} , dimana pita serapan terbesar terdapat pada gelombang 1800-2100 cm^{-1} . Peningkatan gugus fungsi setelah mengalami aktivasi kimia dengan menggunakan KOH, dimana pada range 1680-1800 cm^{-1} teridentifikasi adanya peningkatan gugus aldehida dan keton yang teridentifikasi pada biosorben[15] yakni pada peregangan gugus C=O pada panjang gelombang 1685,79 cm^{-1} ; 1701,22 cm^{-1} ; 1718,58 cm^{-1} dan 1795,73

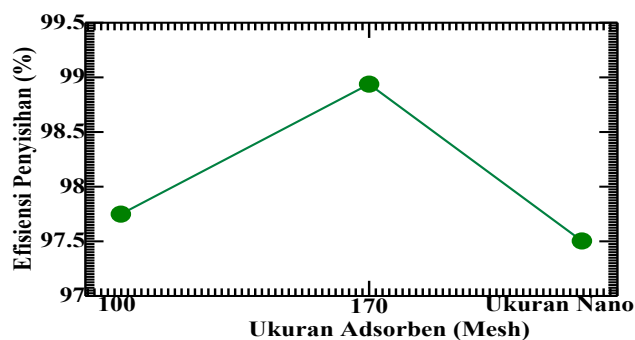
cm^{-1} . Pada panjang gelombang 1375,25 cm^{-1} juga ditemukan gugus alkana yaitu CH_3 pada permukaan adsorben.



Gambar 2. Analisis Gugus Fungsi Adsorben Cangkang Telur Ayam yang Telah Mengalami Proses Kalsinasi, Aktivasi dan Adsorpsi.

Pengaruh Ukuran Adsorben

Ukuran adsorben yang digunakan pada penelitian ini adalah 100 mesh, 170 mesh dan ukuran nano. Dari ketiga ukuran tersebut dilakukan pengujian pendahuluan dengan mengadsorpsi larutan Hg pada konsentrasi 1,0 mg/L; 2,0 mg/L dan 3,0 mg/L selama 60 menit. Kemudian dilakukan pengujian dengan AAS sehingga diketahui efisiensi penyisihan terbaik terdapat pada adsorben dengan ukuran 170 mesh pada konsentrasi 3 mg/L, seperti yang terlihat pada Gambar 3. berikut.

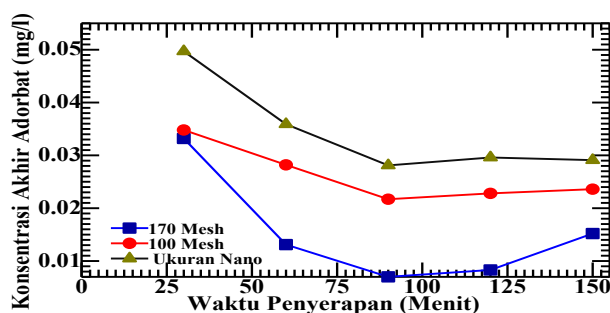


Gambar 3. Pengaruh Ukuran Adsorben Cangkang Telur Ayam Terhadap Efisiensi Penyisihan (%)

Berdasarkan penelitian terdahulu yang menggunakan zeolit alam sebagai adsorben untuk penurunan kadar logam besi dikemukakan bahwa semakin kecil ukuran partikel maka semakin besar kemampuan penyerapan (kapasitas adsorpsi) yang dimiliki oleh bahan penyerap tersebut [6]. Dalam hal ini, adsorben cangkang telur ayam dengan kandungan CaCO_3 yang mencapai 98% dengan ukuran nano pada saat kalsinasi dengan suhu tinggi menyebabkan permukaan rongga pori menjadi dangkal sehingga mempengaruhi daya serap logam Hg menjadi rendah.

Penentuan Waktu Kesetimbangan

Untuk mengetahui pengaruh waktu kesetimbangan (waktu dimana tidak terjadi lagi penyerapan) dilakukan uji pendahuluan dengan memvariasikan waktu kontak yaitu 30, 60, 90, 120, dan 150 menit pada konsentrasi Hg 3 mg/L terhadap adsorben. Gambar 4 menunjukkan waktu kontak optimum adsorben cangkang telur ayam dengan ukuran adsorben sebesar 170 mesh adalah pada waktu 90 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat sebesar 0,0070 mg/L. Hal ini disebabkan karena pada menit ke 120 cenderung tidak terjadi peningkatan kapasitas penyerapan secara signifikan, bila dibandingkan dengan menit sebelum 90.



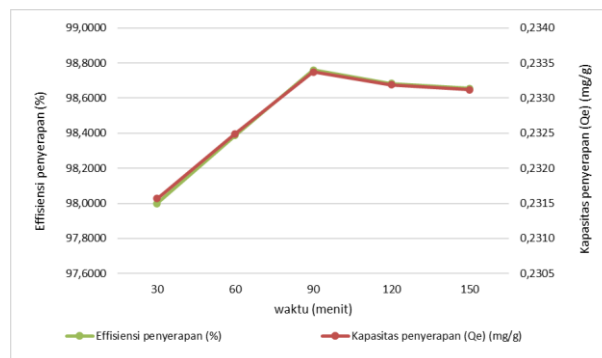
Gambar 4. Hubungan Antara Waktu Kontak Penyerapan (Menit) dengan Konsentrasi Akhir Adsorbat (mg/L)

Waktu kontak optimum untuk adsorben berukuran 100 mesh dan nano terdapat pada waktu 90 menit dengan konsentrasi akhir adsorbat masing masing sebesar 0,0217 mg/L dan 0,0281 mg/L. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas penyerapan adsorben menuju titik kesetimbangan. Sebelum tercapai kondisi setimbang pada waktu awal adsorpsi 90 menit, *driving force* yaitu perbedaan konsentrasi ion logam pada fase cair-padat sangat tinggi sehingga kecepatan transfer massa dari fase cairan limbah ke dalam adsorben sangat cepat. Kemudian, dengan semakin meningkatnya waktu adsorpsi *driving force* makin mengecil hingga tercapai kondisi kesetimbangan [16], [17].

Pengaruh Waktu Kontak terhadap Efisiensi Penyisihan Hg

Lamanya waktu kontak antara adsorbat dan adsorben akan mempengaruhi efisiensi penyisihan Hg. Gambar 5 menunjukkan pengaruh waktu kontak terhadap efisiensi dan kapasitas penyerapan. Efisiensi penyisihan logam Hg tertinggi adalah sebesar 99,7038% yang dihasilkan dengan menggunakan adsorben berukuran 170 mesh pada waktu 90 menit. Penurunan efisiensi penyisihan disebabkan karena jumlah ion logam dalam larutan tidak sebanding dengan jumlah pertikel adsorben yang tersedia sehingga permukaan adsorben akan mencapai titik jenuh dan efisiensi penyisihan pun menjadi menurun. Semakin lama waktu adsorpsi maka persentase ion logam yang teradsorpsi semakin bertambah sampai mencapai

kesetimbangan dan pada waktu berikutnya mengalami kejenuhan [18].



Gambar 5. Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Penyerapan (%) dan Kapasitas Penyerapan (mg/g)

Pengaruh Waktu Kontak terhadap Kapasitas Penyerapan

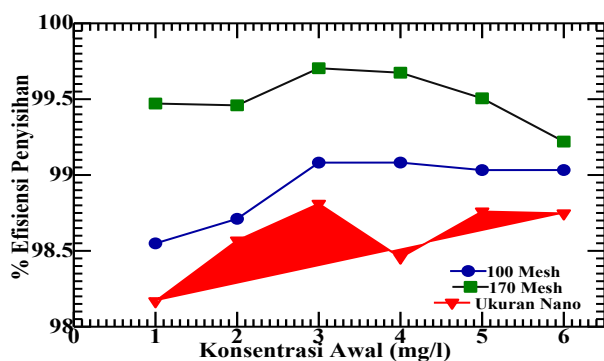
Untuk mengetahui pengaruh waktu adsorpsi terhadap kapasitas penyerapan ion Hg oleh adsorben cangkang telur, percobaan dilakukan dengan berbagai variasi waktu kontak. Semakin lama waktu kontak maka konsentrasi ion logam Hg yang terserap akan semakin meningkat hingga terjadinya kesetimbangan. Waktu kontak antara ion logam dengan adsorben sangat mempengaruhi daya serap, semakin lama waktu kontak maka penyerapan juga akan meningkat hingga pada waktu tertentu akan mencapai titik maksimum dan setelah itu akan menurun penyerapannya [18].

Berdasarkan Gambar 5 dapat diketahui bahwa kapasitas penyerapan meningkat seiring dengan pertambahan waktu kontak antara adsorben dan adsorbat. Hal ini terjadi karena semakin lama waktu kontak, maka laju penyerapan akan semakin meningkat. Selain itu, dapat dilihat pula bahwa pada awal proses, laju penyerapan adsorbat sangat tinggi yaitu pada menit ke-30 dan mengalami peningkatan yang cenderung stabil pada menit berikutnya hingga mencapai menit ke-150.

Peneliti sebelumnya [18] menyatakan bahwa lamanya waktu kontak menyebabkan ruang adsorben yang terisi lebih banyak, sehingga semakin sulit adsorbat untuk menemukan ruang kosong yang tersedia. Hal ini menyebabkan kuantitas adsorbat yang diserap oleh adsorben pada waktu tertentu akan mulai memasuki keadaan statis atau dengan peningkatan yang relatif rendah. Gambar 6 juga menunjukkan waktu kesetimbangan (t_e) diperoleh pada menit ke-90, dimana pada waktu tersebut persentase penyerapan logam Hg oleh adsorben cangkang telur mencapai kondisi setimbang.

Pengaruh Konsentrasi Awal Adsorbat terhadap Efisiensi Penyerapan Hg

Pengaruh konsentrasi awal adsorbat terhadap kapasitas penyerapan ion logam Hg percobaan dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi adsorbat yaitu 1,0 mg/L; 2,0 mg/L; 3,0 mg/L; 4,0 mg/L; 5,0 mg/L dan 6,0 mg/L. Proses adsorpsi dilakukan dengan waktu kontak 90 menit. Untuk menentukan pengaruh konsentrasi awal adsorbat terhadap efisiensi penyerapan dan diplotkan pada grafik hubungan antara konsentrasi awal adsorbat (Co) dengan efisiensi penyisihan (%), sebagaimana pada Gambar 7 berikut.



Gambar 7. Pengaruh Konsentrasi Awal (ppm) Terhadap Efisiensi Penyisihan (%)

Berdasarkan Gambar 7 dapat diketahui bahwa efisiensi penyerapan pada berbagai konsentrasi cenderung menurun. Konsentrasi merupakan *driving force* yang sangat penting dalam suatu fenomena perpindahan massa antara fase larutan ke fase padat[17]. Sehingga penyisihan adsorbat akan sangat bergantung kepada konsentrasi awal adsorbat. Penyisihan adsorbat akan cepat pada interval awal dan akhirnya akan mencapai keadaan konstan untuk waktu yang lebih besar. Laju adsorpsi awal ditentukan oleh adanya sisi aktif yang bebas. Pada konsentrasi rendah, rasio permukaan sisi aktif untuk konsentrasi awal adsorbat lebih luas, sehingga persentase penyisihan tinggi dan untuk konsentrasi awal yang lebih tinggi maka ruang dari sisi aktif semakin sedikit sehingga persentase penyisihan cenderung berkurang.

Penurunan kapasitas penyerapan disebabkan oleh adanya ion-ion logam Hg yang saling bersaing untuk berikatan dengan adsorben dan menyebabkan ion-ion logam tersebut yang telah terserap terlepas kembali ke permukaan adsorben.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa adsorben cangkang telur ayam mencapai 99,22%.

Sebagaimana analisis karakteristik dilakukan untuk melihat sejumlah situs aktif dari gugus hidroksil dan karboksilat pada permukaan adsorben cangkang telur ayam. Adapun waktu kesetimbangan yang diperoleh pada uji pendahuluan adalah pada menit ke-90. Dan efisiensi penyerapan tertinggi diperoleh pada konsentrasi awal logam Hg sebesar 3,0 mg/L dengan ukuran adsorben 170 mesh yaitu 99,70%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Nh, K. Akli, R. Youfa, M. I. Senjawati, and M. Khairati, "Biosorption of Cu(II) metal ions in fixed column by using coconut husk waste," *Orient. J. Chem.*, vol. 34, no. 4, pp. 2192–2196, 2018, doi: 10.13005/ojc/3404062.
- [2] A. Ekawanti and S. Priyambodo, "Intoksikasi merkuri: faktor risiko, patofisiologi dan dampaknya bagi wanita hamil di daerah lingkaran tambang," *Unram Med. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 158–165, 2020, doi: 10.29303/jk.v9i2.4356.
- [3] S. H. Abbas and Firman, "Studi perbandingan pengolahan emas skala kecil dengan metode amalgamasi dan sianidasi di Desa Anggai Kecamatan Obi Kabupaten Halmahera Selatan," *J. Geomining Tek. Pertamb. Unkhair*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2022.
- [4] T. Yorifuji, "Lessons from an early-stage epidemiological study of minamata disease," *J. Epidemiol.*, vol. 30, no. 1, pp. 12–14, 2020, doi: 10.2188/jea.JE20190089.
- [5] N. F. Utami, D. Kurniawati, and U. K. Nizar, "Adsorpsi Ion logam Cd²⁺ dengan menggunakan cangkang telur ayam ras," *J. Period. Jur. Kim. UNP*, vol. 11, no. 3, p. 31, 2022, doi: 10.24036/p.v11i3.116127.
- [6] E. Pelita, R. Youfa, A. B. Sahaq, R. Levi, and M. Miftahurrahmah, "Pengaruh penambahan dolomit terhadap performa fly ash pabrik kelapa sawit pada proses adsorpsi methylene blue," *Indones. J. Chem. Anal.*, vol. 06, no. 01, pp. 63–74, 2023, doi: 10.20885/ijca.vol6.iss1.art7
- [7] L. Darmayanti, S. Notodarmodjo, and E. Damanhuri, "Penyisihan logam Cu (II) dari larutan dengan fly ash batu bara," *J. Neo Tek.*, vol. 4, no. 1, pp. 30–38, 2018, doi:10.37760/neoteknika.v4i1.1064
- [8] R. T. Jayanti, M. Miftahurrahmah, and J. Jerry, "Ekstraksi Silika dari Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Variasi Pelarut Karbonat," *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 12, no. 1, pp. 9–17, 2023.
- [9] W. P. Rahayu, I. W. Harisma, Y. Syamsuddin, S. Sofyana, and S. Mulyati, "Ekstraksi pektin dari kulit jeruk dan kulit pisang sebagai biosorben pada proses adsorpsi logam berat Fe," *J. Serambi Eng.*, vol. 6, no. 2, pp. 1899–1907, 2021, doi: 10.32672/jse.v6i2.2891.

- [10] D. G. Purwitasari, R. Tussania, and R. Fathoni, "Adsorpsi logam kadmium (Cd) pada kadmium sulfat (CdSO_4) menggunakan batang pohon pisang sebagai adsorben," *J. Chemurg.*, vol. 6, no. 1, p. 52, 2022, doi: 10.30872/cmug.v6i1.7905.
- [11] K. Anwar, M. Mardiyono, and N. Harmastuti, "Karakteristik Pektin Kulit Buah Sukun (*Artocarpus altilis* (Park.) Fosberg) dan Uji Kemampuan Adsorpsi Logam Berat pada Limbah Laboratorium Stifera Semarang," *J. Ilm. Sains*, vol. 22, no. 1, p. 8, 2022, doi: 10.35799/jis.v22i1.35537.
- [12] S. Nadeak, J. Mentari Hasibuan, L. Widya Naibaho, and M. Suriani Sinaga, "Pemanfaatan limbah cangkang telur ayam sebagai adsorben pada pemurnian gliserol dengan metode asidifikasi dan adsorpsi," *J. Tek. Kim. USU*, vol. 8, no. 1, pp. 25–31, 2019, doi: 10.32734/jtk.v8i1.1872.
- [13] M. Miftahurrahmah, S. Suhendrayatna, and M. Zaki, "Penyisihan ion logam merkuri (Hg^{2+}) menggunakan adsorben berbahan baku limbah pertanian dan gulma tanaman," *J. Tek. Kim. USU*, vol. 6, no. 1, pp. 7–11, 2017, doi: 10.32734/jtk.v6i1.1558.
- [14] "SNI, Standar Nasional Indonesia No. 06-3730-1995, Arang Aktif," *Badan Standarisasi Nas.*, 1995.
- [15] J. P. Lima, G. Alvarenga, A. C. F. Goszczynski, G. R. Rosa, and T. J. Lopes, "Batch adsorption of methylene blue dye using enterolobium contortisiliquum as bioadsorbent: experimental, mathematical modeling and simulation," *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 91, pp. 362–371, 2020, doi: 10.1016/j.jiec.2020.08.029.
- [16] Y. Yustinah, H. Hudzaifah, M. Aprilia, and S. AB, "Keseimbangan adsorpsi logam berat (Pb) dengan adsorben tanah diatomit secara batch," *J. Konversi*, vol. 9, no. 2, pp. 17–27, 2019.
- [17] H. Naidu and A. P. Mathews, "Linear driving force analysis of adsorption dynamics in stratified fixed-bed adsorbers," *Sep. Purif. Technol.*, vol. 257, no. March 2020, p. 117955, 2021, doi: 10.1016/j.seppur.2020.117955.
- [18] L. Dini, R. A. Kusumadewi, and R. Hadisoebroto, "Adsorpsi logam berat krom (Cr) dan zat warna dengan adsorben kulit pisang kepok dalam air limbah batik," *J. Reka Lingkungan*, vol. 11, no. 1, pp. 37–48, 2023, doi: 10.26760/rekalingkungan.v11i1.37-48.