



Adsorpsi Selektif Ion Cd^{2+} Menggunakan Silika Mesopori MCM-48- NH_2

Andi Yanti Puspita Sari^{1*}, Muhammad Mulyadi Nahrur², Besse Illang Sari³,
Siti Khairunnur⁴

¹⁻⁴ Program Studi Kimia, Universitas Tamalatea Makassar, Indonesia

*Penulis Korespondensi: yha2nkchemist@gmail.com

Abstract. The danger of cadmium contamination in water sources remains a crucial environmental issue due to its persistent nature and high toxicity level, which poses serious risks to human health and ecosystems. Cadmium is a non-biodegradable heavy metal that can accumulate in living organisms over time. The presence of these toxic Cd^{2+} ions is known to trigger damage to vital organs such as the liver and kidneys; therefore, reducing their concentration in aquatic environments is of paramount importance for environmental protection and public health safety. Among various treatment methods, adsorption is considered one of the most effective and economical techniques for removing heavy metal ions from contaminated water. In this study, the capability of mesoporous silica MCM-48- NH_2 as an adsorbent for Cd^{2+} ions was systematically evaluated. The adsorption performance was examined by investigating several important parameters, including contact time, solution acidity level (pH), and initial Cd^{2+} concentration. Furthermore, the adsorption mechanism and interaction between Cd^{2+} ions and the adsorbent surface were analyzed using Langmuir and Freundlich isotherm models. The results demonstrate that the adsorption process of Cd^{2+} ions onto MCM-48- NH_2 tends to follow the Langmuir isotherm model, indicating monolayer adsorption behavior, with a maximum adsorption capacity of 0.66 mmol g^{-1} .

Keywords: Adsorption; Cd^{2+} ; Heavy Metal; Isothermal; MCM-48- NH_2 .

Abstrak. Bahaya kontaminasi kadmium pada sumber air masih menjadi isu lingkungan yang krusial karena sifatnya yang persisten dan tingkat toksisitasnya yang tinggi, sehingga menimbulkan risiko serius terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Kadmium merupakan logam berat yang tidak dapat terurai secara hayati dan dapat terakumulasi dalam organisme hidup seiring waktu. Keberadaan ion Cd^{2+} yang bersifat toksik diketahui dapat menyebabkan kerusakan pada organ vital seperti hati dan ginjal; oleh karena itu, pengurangan konsentrasinya di lingkungan perairan menjadi sangat penting untuk perlindungan lingkungan dan keselamatan kesehatan masyarakat. Di antara berbagai metode pengolahan, adsorpsi dianggap sebagai salah satu teknik yang paling efektif dan ekonomis untuk menghilangkan ion logam berat dari air yang tercemar. Dalam penelitian ini, kemampuan silika mesopori MCM-48- NH_2 sebagai adsorben untuk ion Cd^{2+} dievaluasi secara sistematis. Kinerja adsorpsi dikaji dengan meneliti beberapa parameter penting, meliputi waktu kontak, tingkat keasaman larutan (pH), dan konsentrasi awal Cd^{2+} . Selain itu, mekanisme adsorpsi serta interaksi antara ion Cd^{2+} dan permukaan adsorben dianalisis menggunakan model isoterm Langmuir dan Freundlich. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses adsorpsi ion Cd^{2+} pada MCM-48- NH_2 cenderung mengikuti model isoterm Langmuir, yang mengindikasikan perilaku adsorpsi monolapis, dengan kapasitas adsorpsi maksimum sebesar $0,66 \text{ mmol g}^{-1}$.

Kata Kunci: Adsorpsi; Cd^{2+} ; Isotermal; Logam Berat; MCM-48- NH_2 .

1. LATAR BELAKANG

Kadmium diklasifikasikan sebagai polutan logam berat yang tidak dapat terurai secara alami (*non-biodegradable*), sehingga kehadirannya dalam kadar rendah sekalipun tetap mengancam ekosistem dan kesehatan manusia. Kontaminasi ini umumnya bersumber dari aktivitas pertambangan serta pembuangan limbah industri seperti pembuatan baterai Ni-Cd dan pelapisan logam. Fakta tersebut mendorong perlunya penerapan teknologi pemurnian air limbah yang efisien guna menekan kadar ion logam agar tidak melampaui ambang batas aman yang ditetapkan (Al-Homaidan et al., 2020; Li et al., 2017; Wang & Chen, 2020).

Metode adsorpsi adalah salah satu teknik yang paling menjanjikan karena biaya yang relatif rendah, kemudahan operasional, dan efisiensi yang tinggi dalam menghilangkan polutan

konsentrasi rendah. Penelitian mengenai penggunaan adsorben baru terus berkembang pesat dalam dekade terakhir (Li et al., 2021; Li et al., 2017; Zhou & Zhang, 2022). Dalam beberapa tahun terakhir, material berpori terstruktur seperti silika mesopori (misalnya MCM-41, SBA-15, dan MCM-48) telah menarik perhatian luas (Al-Homaidan et al., 2020; He et al., 2021; Najafi & Yousefi, 2018). Silika mesopori MCM-48 secara khusus memiliki struktur pori kubik tiga dimensi yang unik, memberikan akses yang lebih baik ke situs aktif adsorpsi dibandingkan material mesopori lainnya (Anbia & Khazaei, 2017; He et al., 2021; Sellaoui et al., 2016). Namun, permukaan silika (SiO_2) yang alami

hanya memiliki gugus silanol (Si-OH) yang afinitasnya rendah terhadap kation logam berat. Oleh karena itu, fungsionalisasi permukaan dengan gugus pengkhelat, seperti gugus amin ($-\text{NH}_2$) sangat diperlukan. Gugus amin dapat berinteraksi kuat dengan ion logam Cd^{2+} melalui pembentukan ikatan koordinasi, secara signifikan meningkatkan selektivitas dan kapasitas adsorpsi (Deng et al., 2019; Kanthasamy & Ponnusamy., 2022; Mohammadi & Shariati, 2019). Upaya fungsionalisasi silika mesopori dengan gugus amin untuk menghilangkan ion Cd^{2+} telah banyak dilaporkan, membuktikan peningkatan kinerja yang signifikan dibandingkan material silika yang tidak dimodifikasi (Bakr et al., 2022; Chen et al., 2023; Badiei et al., 2016; Zhang & Li, 2023). Adsorpsi ion Cd^{2+} oleh MCM-48-NH₂ dipelajari sebagai fungsi waktu, pH, dan konsentrasi. Proses desorpsi juga dilakukan untuk menarik kembali ion Cd^{2+} dari MCM-48-NH₂ yang digunakan (Deng et al., 2019; He et al., 2021; Huang et al., 2018). Berdasarkan tinjauan dari latar belakang di atas, telah dilakukan aplikasi silika mesopori MCM-48-NH₂ sebagai adsorben ion Cd.

2. KAJIAN TEORITIS

Pencemaran lingkungan oleh logam berat kadmium Cd^{2+} telah menjadi isu global yang mendesak karena sifatnya yang sulit terurai secara hayati (*non-biodegradable*) dan persisten, yang dapat menyebabkan kerusakan serius pada organ vital seperti ginjal dan hati manusia (Al-Homaidan et al., 2020; Wang & Chen, 2020). Keberadaan polutan ini di perairan sering kali berasal dari aktivitas industri seperti pertambangan, pembuatan baterai, dan pelapisan logam, sehingga diperlukan metode pengolahan air limbah yang efisien untuk menekan konsentrasinya hingga di bawah ambang batas aman (Li et al., 2017; Zhang & Li, 2023). Di antara berbagai teknik yang tersedia, adsorpsi dianggap sebagai salah satu metode yang paling menjanjikan karena biaya operasional yang rendah, kemudahan penggunaan, serta efisiensi yang tinggi khususnya untuk mengurangi polutan pada konsentrasi rendah (Li et al., 2021; Zhou & Zhang, 2022).

Dalam pengembangan material penyerap, silika mesopori seperti MCM-48 menarik perhatian besar karena memiliki struktur pori kubik tiga dimensi yang unik dan saling berhubungan (Al-Homaidan et al., 2020; He et al., 2021). Struktur ini memberikan luas permukaan yang besar dan aksesibilitas yang lebih baik bagi ion logam untuk mencapai situs aktif di dalam pori jika dibandingkan dengan material berpori satu dimensi atau dua dimensi lainnya (Anbia & Khazaei, 2017; Sellaoui et al., 2016). Namun, silika murni secara alami memiliki afinitas yang rendah terhadap kation logam berat karena permukaannya hanya didominasi oleh gugus silanol (Si-OH), sehingga modifikasi permukaan melalui fungsionalisasi kimia sangat diperlukan (Anbia & Khazaei, 2017; Najafi & Yousefi, 2018).

Pengenalan gugus pengkhelat seperti gugus amin ($-NH_2$) pada kerangka MCM-48 memungkinkan terjadinya interaksi spesifik melalui pembentukan ikatan koordinasi. Gugus amin memiliki pasangan elektron bebas pada atom nitrogen yang bertindak sebagai basa Lewis untuk mendonorkan elektron kepada ion Cd^{2+} yang bersifat asam Lewis, sehingga membentuk kompleks permukaan yang stabil (Deng et al., 2019; Mohammadi & Shariati, 2019). Peningkatan jumlah gugus amin pada permukaan secara langsung berkorelasi dengan peningkatan kapasitas dan selektivitas adsorpsi terhadap logam target (Kanthasamy & Ponnusamy, 2022; Najafi & Yousefi, 2018).

Mekanisme penyerapan ini secara kuantitatif dipelajari melalui model isothermal adsorpsi, dimana model Langmuir dan Freundlich menjadi parameter utama. Isothermal Langmuir berasumsi bahwa adsorpsi terjadi pada situs aktif yang seragam (homogen) dimana setiap situs hanya dapat mengikat satu molekul adsorbat, sehingga membentuk lapisan tunggal (*monolayer*) tanpa adanya interaksi antar molekul yang teradsorpsi (Bakr et al., 2022; El-Said et al., 2018). Sebaliknya, isothermal Freundlich menggambarkan adsorpsi pada permukaan yang tidak seragam (heterogen) dan tidak terbatas pada pembentukan lapisan tunggal, melainkan dapat terjadi secara berlapis-lapis (*multilayer*) dengan kekuatan ikatan yang bervariasi (Bakr et al., 2022; Li et al., 2017). Berdasarkan data penelitian, kecocokan yang lebih tinggi pada model Langmuir dengan kapasitas 0,66 mmol g⁻¹ menunjukkan bahwa distribusi gugus amin pada MCM-48-NH₂ berlangsung secara merata pada situs-situs yang setara secara energi (Bakr et al., 2022; Chen et al., 2023).

Efisiensi MCM-48-NH₂ dalam mengikat ion Cd^{2+} sangat bergantung pada beberapa faktor. Keasaman larutan atau pH merupakan variabel paling utama karena mempengaruhi tingkat protonasi gugus amin; pada pH rendah, konsentrasi ion H^+ yang tinggi akan memprotonasi gugus amin menjadi $-NH_3^+$ yang menyebabkan gaya tolak-menolak elektrostatis terhadap kation Cd^{2+} sedangkan kenaikan pH akan meningkatkan deprotonasi dan

memfasilitasi pembentukan ikatan koordinasi (Deng et al., 2019; He et al., 2021). Selain pH, waktu kontak menentukan tercapainya kesetimbangan dinamis antara laju adsorpsi dan desorpsi, sementara konsentrasi awal adsorbat memberikan gaya dorong difusi untuk mengatasi hambatan transfer massa dari fase cair ke permukaan adsorben (El-Said et al., 2018; Huang et al., 2018; Najafi & Yousefi, 2018). Dengan mengoptimalkan faktor-faktor tersebut, MCM-48- NH_2 menunjukkan potensi besar sebagai adsorben selektif dalam upaya pemulihan lingkungan perairan dari kontaminasi logam berat (Bakr et al., 2022; Zhang & Li, 2023).

3. METODE PENELITIAN

Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah MCM-48- NH_2 , $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, HNO_3 1 M, HCl 1 M, Na_2EDTA 1 M, akuabides, kertas pH universal, dan kertas saring Whatman-42.

Alat

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah peralatan gelas yang umum digunakan dalam laboratorium kimia yaitu multistirrer, magnetik stirrer, pH-meter, neraca analitik, neraca digital, dan spektrofotometer serapan atom.

Prosedur

Penentuan Waktu Optimum Adsorpsi

Penentuan kapasitas adsorpsi diawali dengan memasukkan 0,1 gram MCM-48- NH_2 ke dalam larutan Cd^{2+} 50 ppm sebanyak 50 mL. Campuran tersebut kemudian dihomogenkan menggunakan pengaduk dengan variasi waktu 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, dan 360 menit. Tahap akhir adalah pengukuran absorbansi pada filtrat hasil penyaringan dengan menggunakan spektrofotometer serapan atom.

Penentuan pH Optimum Adsorpsi

Sebanyak 0,1 gram MCM-48- NH_2 dilarutkan ke dalam 50 mL ion Cd^{2+} berkonsentrasi 50 ppm di dalam erlenmeyer. Kondisi keasaman diatur pada rentang pH 2 hingga 7, kemudian dilakukan pengadukan selama waktu optimum. Langkah berikutnya adalah pemisahan fase menggunakan kertas saring Whatman-42, dimana filtrat yang diperoleh kemudian dianalisis nilai absorbansinya menggunakan instrumen spektrofotometer serapan atom.

Penentuan Kapasitas Adsorpsi

Adsorben MCM-48- NH_2 seberat 0,1 gram dikontakkan dengan 50 mL larutan Cd^{2+} pada berbagai tingkat konsentrasi, yaitu 50, 100, 200, dan 400 ppm. Proses pengadukan dilakukan pada kondisi pH dan waktu kontak yang telah mencapai titik optimum. Setelah itu, kertas saring

Whatman-42 digunakan untuk memisahkan filtrat dari residu. Konsentrasi sisa dianalisis melalui pengukuran absorbansi menggunakan spektrofotometer serapan atom. Terakhir, data yang diperoleh dievaluasi menggunakan pendekatan isoterm Freundlich serta Langmuir untuk menentukan kapasitas adsorpsinya.

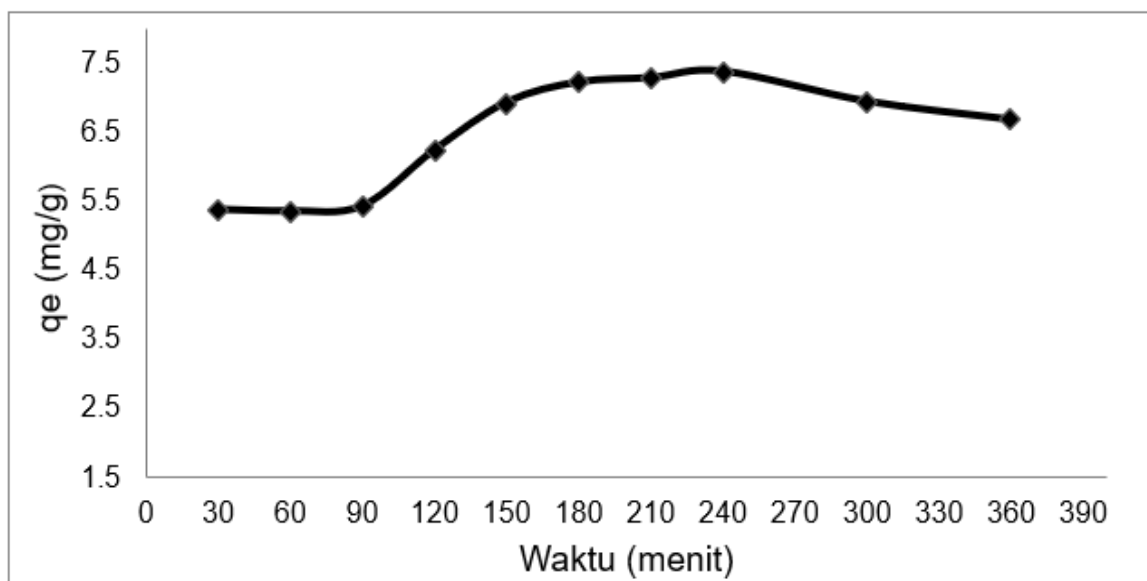
Desorpsi Ion Cd^{2+} dari MCM-48-NH₂

MCM-48-NH₂ yang telah mengadsorpsi Cd^{2+} disaring dan dibersihkan dengan akuabides sebelum dikeringkan. Sebanyak 0,1 gram sampel dimasukkan ke dalam gelas kimia berisi 50 mL larutan pendesorpsi yang berbeda yaitu akuabides, HCl 1 M, HNO₃ 1 M, dan Na₂EDTA 1 M, untuk kemudian diaduk selama waktu optimum. Proses akhir adalah menganalisis filtrat menggunakan instrumen laboratorium untuk menentukan kadar Cd^{2+} yang berhasil didesorpsi dari permukaan material.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Waktu Optimum Adsorpsi Ion Cd^{2+}

Jumlah ion Cd^{2+} yang diadsorpsi sebagai fungsi waktu kontak diberikan pada Gambar 1.

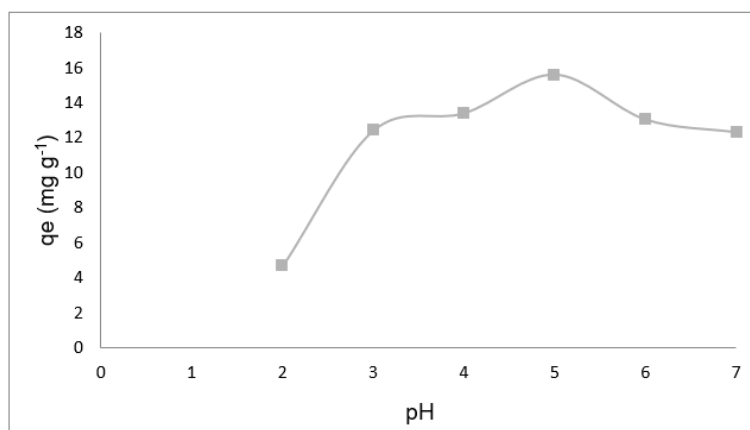


Gambar 1. Jumlah ion Cd^{2+} yang diadsorpsi (q_e) oleh MCM-48-NH₂ sebagai fungsi waktu adsorpsi (konsentrasi awal= 50 ppm).

Berdasarkan Gambar 1, jumlah ion Cd^{2+} yang teradsorpsi dengan waktu kontak 30, 60, dan 90 menit memiliki nilai adsorpsi yang tidak jauh berbeda. Setelah waktu kontak 90 menit, nilai adsorpsi mengalami peningkatan menjadi 6,24 mg/g, cenderung konstan hingga ke waktu kontak 240 menit, dan mengalami penurunan pada waktu kontak 300 dan 360 menit. Nilai adsorpsi terbesar untuk ion Cd^{2+} yaitu 7,38 mg/g dengan waktu kontak 240 menit.

pH Optimum Adsorpsi Ion Cd^{2+}

Pengaruh pH pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.



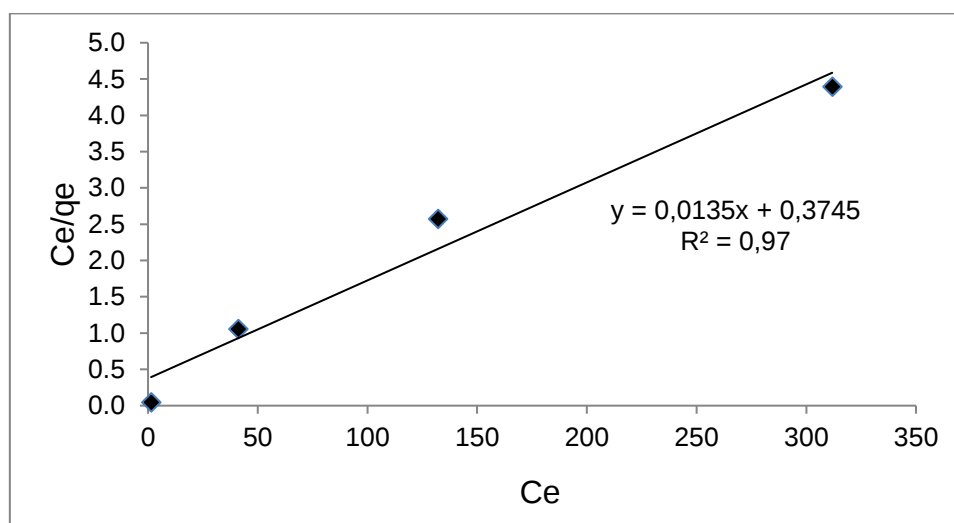
Gambar 2. Pengaruh pH terhadap adsorpsi ion Cd^{2+} oleh MCM-48- NH_2 .

Jumlah ion Cd^{2+} yang diadsorpsi oleh MCM-48- NH_2 meningkat dari pH 2 hingga pH 5, namun setelah pH 5 jumlah ion Cd^{2+} yang diadsorpsi semakin menurun. Hal ini dapat dilihat dari nilai efektivitas adsorpsi (q_e) sebesar 15,62 mg/g pada pH 5 kemudian menurun menjadi 13,05 mg/g pada pH 6.

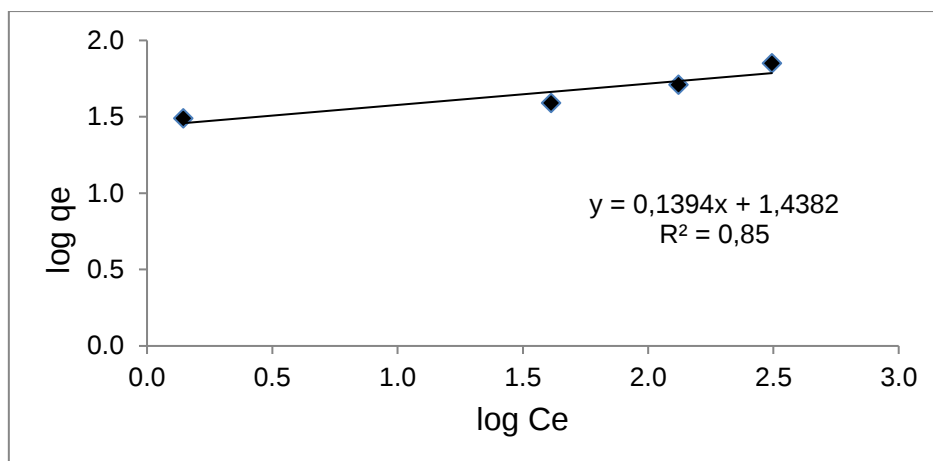
Pengaruh pH pada adsorpsi ion Cd^{2+} oleh MCM-48- NH_2 relatif kecil pada pH 2 hingga 4, ini terjadi karena pada pH sangat asam proses adsorpsi tidak terjadi secara maksimal. Gugus amino ($-\text{NH}_2$) pada MCM-48- NH_2 mengalami protonasi menjadi NH_3^+ pada kondisi asam, sehingga interaksi antara ion Cd^{2+} dengan situs aktif pada adsorben cenderung tidak terjadi secara elektrostatis.

Kapasitas Adsorpsi Ion Cd^{2+}

Model isothermal Langmuir dan Freundlich digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi Cd^{2+} oleh MCM-48- NH_2 yang ditunjukkan oleh Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Grafik Isothermal Langmuir adsorpsi ion Cd^{2+} .



Gambar 4. Grafik Isotermal Freundlich adsorpsi ion Cd^{2+} .

Berdasarkan nilai R_2 yang diperoleh dari grafik pada Gambar 3 dan 4 menunjukkan bahwa nilai R_2 pada model isotermal Langmuir dan Freundlich mendekati nilai 1. Hal ini menunjukkan linearitas kurva isotermal Langmuir dan Freundlich yang diperoleh cukup baik. Nilai R_2 yang diperoleh dari kedua model isotermal Langmuir dan Freundlich tidak jauh berbeda yang menunjukkan bahwa proses adsorpsi Cd^{2+} oleh MCM-48-NH₂ sesuai dengan kedua model isotermal tersebut, akan tetapi lebih dominan mengikuti model isotermal Langmuir dengan nilai kapasitas adsorpsi yaitu 0,66 mmol g⁻¹.

Desorpsi Ion Cd^{2+} dari MCM-48-NH₂

Beberapa larutan agen pendesorpsi yang digunakan untuk menarik kembali ion Cd^{2+} dari MCM-48-NH₂ yaitu akuabides, HNO₃ 1 M, HCl 1 M, dan Na₂EDTA 1 M. Larutan pendesorpsi yang tepat untuk digunakan ditentukan dari persen terdesorpsi yang paling tinggi nilainya untuk menarik kembali ion Cd^{2+} dari MCM-48-NH₂.

Hasil desorpsi dari masing-masing agen pendesorpsi yang digunakan adalah H₂O (0,02%), HNO₃ 1 M (94,35%), HCl 1 M (93,63%), dan Na₂EDTA 1 M (79,61%). Berdasarkan data yang diperoleh, maka pendesorpsi yang efektif digunakan untuk menarik kembali ion Cd^{2+} dari MCM-48-NH₂ yaitu HNO₃ 1 M.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi optimum pada adsorpsi ion Cd^{2+} oleh MCM-48-NH₂ adalah pada pH 5 dengan waktu kontak 240 menit. Berdasarkan uji isotermal, model Langmuir memberikan hasil yang lebih sesuai untuk uji adsorpsivitas ion Cd^{2+} oleh MCM-48-NH₂ dengan nilai kapasitas 0,66 mmol g⁻¹. Agen pendesorpsi yang tepat digunakan untuk menarik kembali ion Cd^{2+} dari MCM-48-NH₂ adalah HNO₃ 1 M.

DAFTAR REFERENSI

- Al-Homaidan, A. A., Al-Jameel, H. A., & Bakhurji, A. A. (2020). Synthesis and characterization of MCM-48 and its application for the removal of heavy metals from wastewater. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 1163–1175. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.10.001>
- Anbia, M., & Khazaei, M. (2017). Ordered mesoporous silica (MCM-48) modified with amino groups as an efficient adsorbent for the removal of Cd(II) and Pb(II) from aqueous solutions. *Optics and Photonics Journal*, 7(8), 1–13. <https://doi.org/10.4236/opj.2017.78B001>
- Badiei, A., Haririan, I., Jahangir, M., & Ziarani, G. M. (2016). Functionalization of MCM-48 mesoporous silica with amino groups for adsorption of heavy metal ions. *Journal of Nanostructures*, 6(1), 23–29. <https://doi.org/10.7508/jns.2016.01.004>
- Bakr, M. F., El-Sayed, A. B., & El-Maghrabi, M. H. (2022). Amino-functionalized mesoporous silica MCM-48 composite for enhanced adsorption of Cd^{2+} ions from aqueous solution: Adsorption isotherm and kinetic studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(4), 108105. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108105>
- Chen, J., Wang, Q., Li, J., Ma, J., & Zhang, Y. (2023). Highly efficient removal of Cd^{2+} from aqueous solution by thiol-functionalized MCM-48 derived from fly ash: Optimization, isotherms, and kinetics. *Chemosphere*, 312, 137351. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137351>
- Deng, S., Zhang, J., Guo, J., Zhang, C., & Wang, Y. (2019). Functionalized SBA-15 and MCM-41 mesoporous silica with amine groups for enhanced Cu^{2+} and Cd^{2+} adsorption: Adsorption behavior and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 355, 663–673. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.184>
- El-Said, A. G., Badawy, N. A., & Garamon, S. E. (2018). Adsorption of Cd(II) and Cu(II) from aqueous solution onto modified MCM-48: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Basic and Environmental Sciences*, 5, 233–245. <https://doi.org/10.21608/jbes.2018.63223>
- Hanif, R. M., Ilias, I., Aulia, S. N., & Fardiaz, D. (2024). Performance of MCM-48-NH₂ for the removal of heavy metal ions: A review of recent advancements. *Environmental Pollution Research Journal*, 11(1), 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.eprj.2023.11.005>
- He, Y., Xu, G., & Li, S. (2021). Cubic mesoporous silica MCM-48 functionalized with different amino-silanes for efficient removal of cadmium ions. *Microporous and Mesoporous Materials*, 310, 110642. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110642>
- Huang, Y., Zeng, X., Guo, L., Lan, J., Zhang, L., & Cao, D. (2018). Heavy metal ion removal of amino-functionalized MCM-41 synthesised from natural diatomite. *Water Science and Technology*, 77(1), 161–170.
- Kanthasamy, R., & Ponnusamy, S. K. (2022). Selective adsorption of Cd(II) ions from industrial effluents using amine-grafted mesoporous silica: Regeneration and reuse. *Environmental Technology & Innovation*, 25, 102143.
- Li, G., Wang, B., Sun, Q., & Wang, W. (2017). Adsorption of cadmium(II) from aqueous solution by amine-functionalized MCM-48: Isotherms and kinetics. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(10), 382.

- Li, Z., Zhou, J., Feng, C., & Zhang, W. (2021). Preparation of amino-modified mesoporous silica adsorbent for effective removal of heavy metal ions Cu^{2+} and Cd^{2+} . *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 618, 126442. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2021.126442>
- Ma, Y., Liu, C., & Wang, X. (2020). Adsorption performance and mechanism of heavy metals on MCM-48 mesoporous materials. *Journal of Hazardous Materials*, 387, 121703. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121703>
- Mohammadi, S., & Shariati, S. (2019). Development of an amino-functionalized MCM-48 for highly selective removal of Cd^{2+} and Ni^{2+} from complex water matrices. *Separation Science and Technology*, 54(12), 1954–1967. <https://doi.org/10.1080/01496395.2018.1543315>
- Najafi, M., & Yousefi, Y. (2018). Synthesis of amino-functionalized MCM-48 for the removal of heavy metal ions: Effect of pore structure and surface density of functional groups. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 481, 412–420. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.11.025>
- Sellaoui, L., Guedidi, H., Knani, S., Reinert, L., Duclaux, L., & Lamine, A. B. (2016). Application of statistical physics formalism to the adsorption isotherms of Cd^{2+} and Ni^{2+} onto modified MCM-48 silica. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 461, 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.05.060>
- Wang, J., & Chen, C. (2020). Adsorption of heavy metals by mesoporous silica materials: A review of recent studies. *Journal of Environmental Management*, 268, 110744. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110744>
- Zhang, L., & Li, Y. (2023). Enhanced selective adsorption of Cd(II) ions by 3-aminopropyltriethoxysilane-functionalized cubic MCM-48. *International Journal of Environmental Research*, 17(2), 45–58. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00518-2>
- Zhou, X., & Zhang, H. (2022). Amine-functionalized mesoporous silica for heavy metal removal: Comparative study between MCM-41, MCM-48, and SBA-15. *Materials Chemistry and Physics*, 276, 125411. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125411>