



Adsorpsi Ion Cr (III) Menggunakan Zeolit Alam Termodifikasi Dietanolamin

Isharyanti¹, Sriatun^{1*}, dan Choiril Azmiyawati¹

¹Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro. Jl. Prof. Sudarto SH, Tembalang, Semarang 50275

*Corresponding author: sriatun@live.undip.ac.id

Received: 26 Mei 2024 / Accepted: 26 Juni 2024

Available online: 18 Juli 2024

Abstrak

Telah dilakukan modifikasi zeolit alam dengan dietanolamin dan digunakan untuk adsorpsi ion Cr(III). Tujuan penelitian ini adalah memperoleh zeolit termodifikasi Dietanolamin (DEA) (5, 10 dan 15% v/v) dan menentukan kemampuan adsorpsi zeolit termodifikasi DEA terhadap ion Cr (III) pada variasi pH (2, 3, 4, 6, dan 6) dan konsentrasi ion Cr (III) (750, 1000, 1500, 2000, dan 2500). Hasil karakterisasi dengan FTIR menunjukkan serapan pada bilangan gelombang 1303,88 dan 1381,03 cm⁻¹ yang merupakan vibrasi ulur -CN, serta 1543,05 cm⁻¹ yang merupakan vibrasi tekuk -NH. Kemampuan adsorpsi terhadap ion krom (III) terbaik sebesar 50,73 mg/g oleh adsorben Zeolit DEA 10% pada pH = 5 dan konsentrasi ion Cr (III) 1000 ppm.

Kata Kunci: Zeolit alam, dietanolamin (DEA), adsorpsi, ion Cr (III)

1. Pendahuluan

Krom merupakan salah satu logam berat yang bersifat polutan berbahaya/toksik di lingkungan perairan sehingga keberadaannya harus ditangani dengan baik [1]. Krom (III) dalam jumlah sedikit merupakan nutrisi esensial bagi berbagai organisme, namun dalam jumlah banyak Cr(III) bersifat toksik dan mutagen.

Mengingat bahaya dan pencemaran lingkungan yang ditimbulkan oleh kromium, maka perlu dilakukan pengolahan untuk menghilangkan polutan tersebut. Beberapa teknologi pengolahan, seperti presipitasi kimia [2], ultra filtrasi [3], adsorpsi [4], telah diterapkan untuk penghilangan polutan logam berat. Penggunaan bahan alam yang murah dan keberadaannya di alam sangat melimpah sebagai adsorben alternatif untuk menghilangkan logam berat kini lebih ditekankan.

Zeolit merupakan salah satu bahan alam yang potensial untuk menghilangkan ion logam berat dari industri dan pengolahan air limbah [5]. Zeolit merupakan bahan aluminosilikat terhidrat yang memiliki luas permukaan besar dan kapasitas tukar kation yang tinggi. Sifat tersebut membuat bahan ini sangat berguna untuk banyak aplikasi seperti adsorben [6,7], penukar ion [8,9], dan saringan molekul [10]. Zeolit memiliki permukaan bermuatan negatif dalam struktur kristalnya membuat zeolit tidak memiliki atau sedikit afinitasnya terhadap surfaktan anionik apabila tanpa modifikasi. Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa surfaktan etanolamin

diantaranya monoetanolamin, dietanolamin, dan trietanolamin [11] dapat digunakan untuk memodifikasi zeolit. Penelitian sebelumnya tentang dietanolamin pada γ -Al₂O₃ sebagai adsorben untuk menangkap CO₂ [12]. Namun disini kita menggunakan zeolite karena struktur kerangka zeolit memiliki muatan negatif pada molekul alumina diharapkan mampu menyebabkan terjadinya interaksi elektrostatik dengan ion bermuatan positif (kation) pada dietanolamin (DEA). Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dikaji kemampuan adsorpsi zeolit alam yang telah dimodifikasi dengan Dietanolamin (DEA).

2. Metode Penelitian

Secara garis besar, penelitian ini dilakukan melalui tiga tahap utama, yaitu pertama pembuatan nanogranuler dan aktivasi karbon hitam/arang/biochar. Kedua, karakterisasi karbon aktif nanopartikel, dan ketiga, penerapan karbon aktif nanopartikel sebagai bahan aditif tanah kering/tandus serta uji peningkatan produktifitasnya.

2.1. Alat dan Bahan

Alat: Peralatan yang digunakan adalah peralatan gelas, alat refluks, timbangan digital, ayakan ± 100 mesh, oven, kertas saring Whatman 42, spektrofotometer FTIR (Shimadzu), Spektrofotometer UV-Vis (Shimadzu UV-1700)

Doi:

Bahan: Bahan yang digunakan adalah Zeolit alam Klaten, Jawa Tengah, HF 55% (p.a, Bratachem), Dietanolamin 99% (p.a, Merck), Akuades, Metanol (pa, Merck), NH₄OH 25% (p.a, Merck), CrCl₃.6H₂O (p.a, Merck).

2.2. Cara Kerja

2.2.1 Aktivasi Zeolit

Zeolit alam berukuran 100 mesh direndam menggunakan HF 1% selama 10 menit, lalu disaring dan dicuci dengan akuades sampai pH netral. Setelah netral zeolit disaring dan dioven selama ± 3 jam dengan suhu 90°C. Selanjutnya hasil yang diperoleh dikarakterisasi menggunakan FTIR.

2.2.2 Modifikasi Zeolit dengan Dietanolamin (DEA)

Dietanolamin konsentrasi 5%, 10% dan 15% dibuat dengan melarutkannya dalam metanol, perbandingan 1:10 (v/v). Zeolit yang sudah diaktivasi ditimbang masing-masing 10 gr, kemudian ditambah dietanolamin (DEA) konsentrasi 5%, 10%, dan 15% dengan perbandingan 1:12 (b/v). Selanjutnya campuran zeolit dan dietanolamin direfluks selama ± 36 jam, setelah selesai zeolit dimodifikasi dietanolamin disaring dan kemudian residunya dioven pada suhu 65-70 °C selama ± 2 jam. Selanjutnya hasil yang diperoleh dikarakterisasi menggunakan FTIR.

2.2.3 Uji Kemampuan Adsorpsi Zeolit Alam Termodifikasi DEA

a. Pembuatan Larutan Krom (III) Membuat larutan induk 2500 ppm dengan cara melarutkan CrCl₃.6H₂O 1,28 g dalam 100 ml aquades, kemudian diencerkan menjadi konsentrasi 2000; 1500; 1000; dan 750 ppm.

b. Pengaruh pH Adsorbat

Sebanyak 0,1 g zeolit alam ditambahkan dengan 10 mL larutan logam kromium (III) dengan konsentrasi 1000 ppm yang sudah dikondisikan pHnya. Variasi pH pada adsorpsi larutan kromium (III) adalah 2, 3, 4, 5, dan 6 dilakukan pada kondisi ruang. Campuran diaduk dengan shaker selama 60 menit, kemudian disaring. Filtrat hasil penyaringan kemudian di analisis menggunakan spektrofotometer UV-Vis. Cara yang sama dilakukan untuk zeolit termodifikasi dietanolamin 5%, 10% dan 15%.

c. Pengaruh Konsentrasi Adsorbat

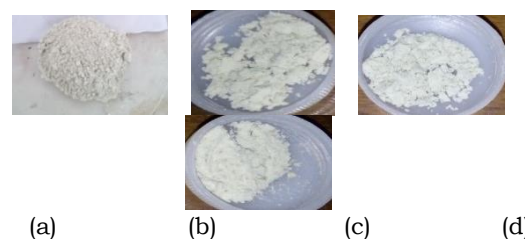
Variasi konsentrasi pada adsorpsi larutan logam kromium (III) adalah konsentrasi 750, 1000, 1500, 2000, dan 2500 ppm dengan kondisi pH optimum yaitu pH 5. Sebanyak 0,1 g zeolit alam ditambahkan dengan 10 mL larutan logam kromium (III) dengan konsentrasi yang sudah dikondisikan. Campuran diaduk dengan shaker selama 60 menit, kemudian disaring. Filtrat hasil penyaringan kemudian dianalisis menggunakan

spektrofotometer UV-Vis. Cara yang sama dilakukan untuk zeolit hasil modifikasi dietanolamin 5%, 10% dan 15%.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Zeolit termodifikasi dietanolamin

Modifikasi zeolit alam menggunakan surfaktan non-ionik dari kelompok alkanolamin, yaitu dietanolamin (DEA). Modifikasi dilakukan dengan metode refluks selama 36 jam dengan variasi konsentrasi DEA sebesar 5, 10, dan 15 % (v/v) dalam pelarut metanol, berikut adalah perubahan fisik dari zeolit alam dan zeolit termodifikasi DEA yang ditampilkan pada Gambar 1.

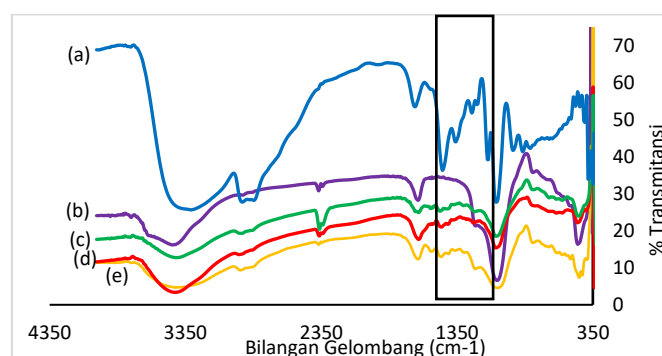


Gambar 1 Perbedaan warna dari a) Zeolit alam, b) ZM-DEA 5%, c) ZM-DEA 10%, dan ZM-DEA 15%

Berdasarkan Gambar 1, menunjukkan bahwa kenampakan fisik dari zeolit alam yang berwarna putih keabu-abuan berubah warna menjadi putih kehijauan setelah ditambahkan DEA, hal tersebut disebabkan karena DEA telah menempel pada permukaan zeolit. Tertempelnya dietanolamin ke dalam zeolit diakibatkan karena adanya interaksi.

3.2. Analisis dan Karakterisasi

Karakterisasi menggunakan FTIR bertujuan untuk menentukan gugus fungsi yang terdapat pada zeolit alam sebelum dan setelah modifikasi. Spektra FTIR zeolit alam dan zeolit termodifikasi diperlihatkan pada Gambar II.



Gambar II Spektra FTIR dari (a) DEA; (b) ZA; (c) ZM-DEA 15%; (d) ZM-DEA 10%; dan (e) ZM-DEA 5%

Gugus fungsi pada zeolit dapat diamati pada rentang bilangan gelombang 300-1300 cm⁻¹ yang merupakan daerah utama serapan ikatan tetrahedral dari komponen utama penyusun zeolit, yaitu SiO₄⁴⁻ dan AlO₄⁵⁻ (Hamdan, 1992). Spektra IR dari zeolit dikelompokkan menjadi (1) serapan pada

Doi:

rentang 4000-1250 cm^{-1} merupakan serapan yang tidak menggambarkan identitas spesifik dari zeolit, (2) serapan sidik jari pada 1250-350 cm^{-1} merupakan identitas spesifik dari zeolit.

Rentang vibrasi simetri O-Al-O atau O-Si-O pada internal tetrahedral muncul pada 750-820 cm^{-1} . Vibrasi tekuk Si-O atau Al-O akan muncul pada 420-500 cm^{-1} , sedangkan serapan pada daerah 950-1250 cm^{-1} menunjukkan asimetri ulur Si-O dan Al-O dari kerangka silika alumina [13], dimana bilangan gelombang ini sangat sensitif terhadap pergeseran akibat perubahan rasio Si/Al [14]. Berdasarkan data perbandingan spektrum FTIR zeolit dan zeolit termodifikasi DEA pada Gambar II, pada bilangan gelombang sekitar 1380-1250 cm^{-1} menunjukkan adanya peregangan C-N amina aromatik dari dietanolamin. Pada zeolit hasil modifikasi muncul puncak baru pada bilangan gelombang 1543,05 cm^{-1} akibat adanya vibrasi tekuk simetri $-\text{NH}_2$ dari dietanolamin [15]. Serapan pada 1303,88 cm^{-1} untuk ZM-DEA 5% dan 1381,03 cm^{-1} untuk ZM-DEA 10% dan ZM-DEA 15% menunjukkan adanya vibrasi ulur C-N. Serapan pada daerah bilangan gelombang sekitar 1350-1580 cm^{-1} merupakan daerah etanolamin vibrasi ulur C-N [16]. Selain itu rentang 2800-3000 cm^{-1} merupakan vibrasi ulur asimetris CH_2 (2939,52-2962,66 cm^{-1}).

Zeolit alam mempunyai dua grup ikatan. Grup pertama pada bilangan gelombang 1630-1640 cm^{-1} yang berhubungan dengan ikatan vibrasi dari molekul air yang teradsorpsi pada zeolit alam (1635,64 cm^{-1}). Grup kedua pada bilangan gelombang 3000-3700 cm^{-1} yang berhubungan dengan tumpangtindih simetris (3410,15-3448,72 cm^{-1}) ([17]).

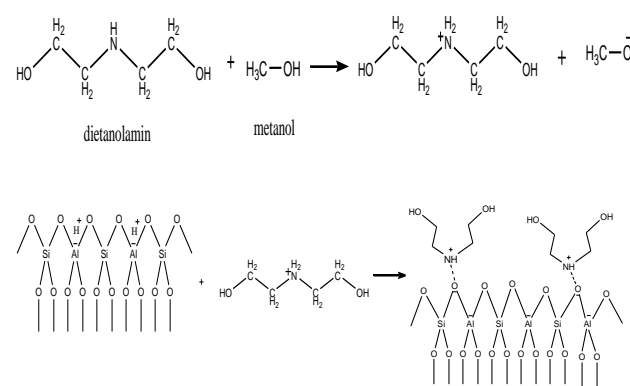
Dari data yang ditunjukkan dalam perbandingan spektra FTIR dari zeolit alam dan zeolit hasil modifikasi dietanolamin pada Gambar II menunjukkan bahwa serapan yang muncul pada zeolit termodifikasi DEA juga terdapat pada spektra DEA, sehingga dapat disimpulkan bahwa DEA telah menempel pada zeolit. Menurut Sayari dkk. (2011) [18], tipe interaksi antara amina dengan adsorben dapat dikategorikan sebagai amina yang terimpregnasi dan amina yang tertanam (*grafted*) pada adsorben melalui interaksi yang lemah dan ikatan kovalen yang kuat.

Berdasarkan perbandingan spektrum FTIR pada Gambar II dapat diperkirakan bahwa interaksi antara zeolit dengan DEA adalah interaksi fisis, hal tersebut dikarenakan tidak munculnya spektra yang menunjukkan adanya interaksi kimia antara zeolit dengan DEA. Interaksi fisis antara zeolit dengan DEA dimungkinkan terjadi antara zeolit dengan DEA akibat adanya kepolaran yang sama. Pada Gambar II terlihat muncul beberapa puncak baru yang tidak ada pada serapan zeolit alam, di antaranya adalah pada serapan 1303,88 cm^{-1} , 1381,03 cm^{-1} , 1543,05 cm^{-1} , yang dimungkinkan pada serapan tersebut kerangka zeolit berasosiasi dengan DEA secara fisis.

Adanya pergeseran bilangan gelombang yang tidak signifikan pada rangka zeolit yang menunjukkan adanya interaksi antara zeolit dengan DEA, yaitu pergeseran yang terjadi pada vibrasi

tekuk Si-O atau Al-O menuju bilangan gelombang yang lebih kecil untuk zeolit termodifikasi DEA 15% menunjukkan adanya ikatan hidrogen antara zeolit dengan pelarut. Pergeseran menuju bilangan gelombang yang lebih besar terjadi pada vibrasi ulur Si-O atau Al-O untuk semua ZM-DEA yang menunjukkan adanya pengurangan jumlah gugus Al, hal tersebut mengindikasikan bahwa gugus Al yang berkurang adalah Al diluar kerangka zeolit. Adanya kandungan Al yang berkurang pada kerangka zeolit menyebabkan intensitas pita yang muncul pada daerah 300 - 1300 cm^{-1} akan berkurang dan bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi. Pergeseran juga terjadi pada vibrasi ulur -OH kearah bilangan gelombang yang lebih kecil untuk semua zeolit termodifikasi DEA yang menunjukkan adanya ikatan hidrogen [18]

Perkiraan interaksi antara zeolit alam dengan DEA dapat diilustrasikan seperti pada Gambar III.



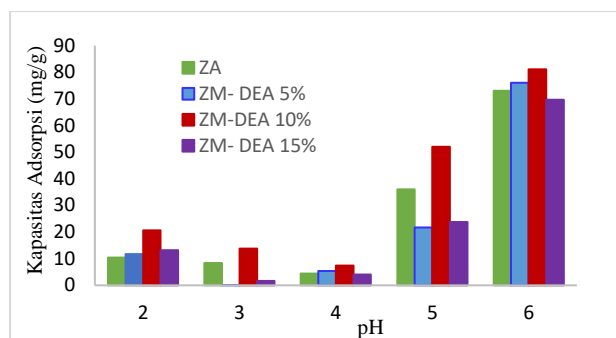
Gambar III Perkiraan interaksi antara zeolit dengan Dietanolamin (DEA)

Berdasarkan Gambar III, DEA terdiri dari gugus polar -OH dan -NH yang memiliki kemampuan untuk berinteraksi dengan gugus polar lain, akan tetapi gugus N pada NH memiliki peranan yang dominan dalam menentukan kebasahan dari DEA akibat adanya elektron tidak berpasangan dari nitrogen sehingga akan membentuk ion DEA^+ ketika dilarutkan dalam metanol, dan $-\text{NH}_2^+$ pada DEA akan berasosiasi dengan O.

3.3. Pengaruh pH larutan pada kemampuan adsorpsi zeolit-DEA terhadap ion Cr (III)

Hasil uji adsorpsi zeolit alam dan zeolit hasil modifikasi pada variasi pH ion logam kromium (III) ditunjukkan pada Gambar IV. Berdasarkan pada kurva Gambar IV, menunjukkan hasil bahwa adsorpsi ion logam Cr (III) menggunakan zeolit alam dan zeolit modifikasi (ZM-DEA) paling banyak adalah pada pH 6.

Doi:



Gambar IV Kurva Variasi pH terhadap kapasitas adsorpsi ZM-DEA

Berdasarkan perhitungan pH dengan nilai K_{sp} $\text{Cr}(\text{OH})_3$ yaitu $6,3 \times 10^{-31}$ pada 25°C [19], ion kromium (III) akan mengendap pada kondisi pH di atas 5,29. Oleh karena itu kapasitas adsorpsi pada pH 6 tidak dapat digunakan untuk menjelaskan kemampuan adsorpsi dari adsorben terhadap ion $\text{Cr}(\text{III})$. Selain itu menurut diagram spesiasi $\text{Cr}(\text{III})$ pada batas kelarutan dan distribusi ion krom sebagai fungsi pH, pada pH 6 persentase spesies $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$ mengalami penurunan dan mulai terjadi pengendapan $\text{Cr}(\text{III})$ dalam bentuk $\text{Cr}(\text{OH})_3$, oleh karena itu parameter pH yang digunakan untuk menentukan kapasitas adsorpsi adalah pada pH 5 dan akan digunakan dalam uji adsorpsi yang lain.

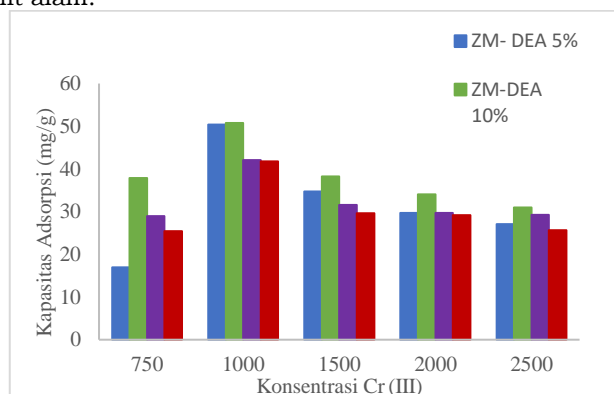
Pada pH 2-4 terjadi penurunan yang signifikan yang disebabkan larutan CrCl_3 cenderung asam sehingga adsorpsi menurun dan adanya kompetisi antara muatan positif dari ion hidrogen (H^+) dan ion logam di permukaan zeolit yang bermuatan negatif [20]. Pada pH 4-5 terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi karena ketika pH meningkat keseimbangan antara H_3O^+ dan OH^- kurang lebih sama, sehingga ion logam bermuatan positif lebih banyak dalam larutan yang teradsorpsi pada permukaan negatif dan dengan demikian adsorpsi ion logam meningkat.

Menurut teori HSAB atau Hard Soft Acids and Base [21] yang menggolongkan asam dalam tiga kategori (asam keras, sedang, dan asam lunak) dan basa juga dalam tiga kategori (basa keras, sedang dan basa lunak). Suatu asam dan basa akan lebih mudah berinteraksi bila sama-sama keras dengan keras, lunak dengan lunak, dan sedang dengan sedang. Pada penelitian ini diketahui bahwa zeolit yang termodifikasi dietanolamin berinteraksi pada permukaan zeolit dan yang paling menentukan gugus yaitu gugus OH^- dari dietanolamin yang merupakan suatu basa keras diharapkan akan berinteraksi dengan logam krom (III) yang merupakan asam keras. Sehingga jika ion logam krom (III) yang ditambahkan terlalu asam ($\text{pH} < 2$) maka terjadi kompetisi antara muatan positif dari ion hidrogen (H^+) dan ion logam krom (III) sehingga adsorpsinya akan menurun.

3.4. Pengaruh konsentrasi ion logam terhadap kemampuan adsorpsi Ion Cr (III)

Tujuan penelitian ini yaitu untuk mendapatkan konsentrasi optimum adsorbat yang dapat di serap oleh zeolit termodifikasi

dietanolamin (DEA). Hasil pengukuran dengan menggunakan spektrometer UV-Vis ditampilkan pada Gambar VI yang menunjukkan bahwa kapasitas zeolit termodifikasi DEA dalam mengadsorpsi ion $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$ lebih besar dibanding zeolit alam, sehingga dapat disimpulkan bahwa modifikasi zeolit alam menggunakan DEA telah berhasil meningkatkan kemampuan adsorpsi dari zeolit alam.



Gambar VI Kurva Variasi Konsentrasi Ion Cr (III) terhadap kapasitas adsorpsi ZM-DEA

Gambar VI menunjukkan bahwa menunjukkan hasil bahwa adsorpsi ion logam kromium (III) menggunakan zeolit alam dan zeolit hasil modifikasi dietanolamin (ZM-DEA) mencapai konsentrasi optimum pada konsentrasi 1000 ppm. Pada konsentrasi yang cenderung tinggi diatas 1000 ppm tidak lagi disertai dengan kenaikan kapasitas adsorpsi ion logam kromium (III) pada zeolit alam maupun zeolit hasil modifikasi Dietanolamin (ZM-DEA) karena terjadi penurunan yang signifikan seiring bertambahnya konsentrasi larutan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa situs aktif adsorben dari zeolit alam dan zeolit hasil modifikasi Dietanolamin (ZM-DEA) pada konsentrasi yang cenderung tinggi telah jenuh oleh ion logam kromium (III) tersebut, sehingga kapasitas adsorpsinya cenderung menurun pada konsentrasi yang tinggi.

Menurut Taffarel & Rubio (2010) [17], penambahan surfaktan anionik dapat meningkatkan kapasitas adsorpsi karena surfaktan anionik tersebut dapat berinteraksi pada permukaan zeolit. Pada zeolit hasil modifikasi ZM-DEA 10% terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi yang lebih besar dibandingkan dengan zeolit alam, hal tersebut dimungkinkan karena pada penambahan dietanolamin 10% pada zeolit alam tidak menutup semua permukaan zeolit alam sehingga yang berperan pada adsorpsi ion logam krom (III) adalah situs aktif zeolit alam dan dietanolamin. Sedangkan pada ZM-DEA 5% dan ZM-DEA 15% terjadi penurunan dimungkinkan karena pada konsentrasi dietanolamin yang rendah maka kemungkinan dietanolamin yang berinteraksi dengan zeolit sedikit sehingga yang berperan dalam adsorpsi juga sedikit yang menyebabkan adsorpsinya turun dan pada konsentrasi dietanolamin yang ditambahkan tinggi menyebabkan permukaan zeolit tertutupi oleh

Doi:

dietanolamin, sehingga hanya dietanolamin saja yang berperan dalam proses adsorpsi yang menyebabkan kapasitas adsorpsi dari ion logam krom (III) menjadi berkurang.

4. Kesimpulan

Telah diperoleh zeolit termodifikasi dietanolamin (ZM-DEA) dengan perbandingan konsentrasi dietanolamin 5%, 10%, dan 15% volume/volume. Dari hasil uji kemampuan adsorpsi terhadap ion logam kromium (III) pada variasi pH (2, 3, 4, 5, 6,) dan konsentrasi (750, 1000, 1500, 2000 dan 2500 ppm) yang digunakan, adsorpsi paling baik ditunjukkan pada pH 5 dengan konsentrasi 1000 ppm untuk ZM-DEA 5% dengan 50,40 mg/g, ZM-DEA 10% dengan 50,73 mg/g, ZM-DEA 15% dengan 42,07 mg/g, dan Zeolit alam dengan 41,73 mg/g.

Daftar Pustaka

- Kaźmierczak, B., Molenda, J., & Swat, M. (2021). The adsorption of chromium (III) ions from water solutions on biocarbons obtained from plant waste. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101737. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101737>
- Bai, W., Tang, R., Wu, G., Wang, W., Yuan, S., Xiao, L., Zhan, X., & Hu, Z.-H. (2023). Coprecipitation of heavy metals with struvite from digested swine wastewater: Role of suspended solids. *Journal of Hazardous Materials*, 455, 131633. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131633>
- Deekshitha, K., Rao, M. S., Rebello, N., Ramaprasad, A. T., Jayarama, A., & Pinto, R. (2022). A novel cross-linked PVA-Chitosan composite membrane for heavy metal filtration applications. *Materials Today: Proceedings*, 66, 2493-2498. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.487>
- Rostami, M. S., & Khodaei, M. M. (2024). Recent advances in chitosan-based nanocomposites for adsorption and removal of heavy metal ions. *International Journal of Biological Macromolecules*, 132386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbio.2024.132386>
- Sriatun, S., Manasikana, O. A., & Darmawan, A. (2008). Modifikasi Zeolit Alam dengan Ligan EDTA untuk Adsorpsi Ion Logam Pb²⁺ dan Cd²⁺. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi; Vol 11, No 2 (2008): Volume 11 Issue 2 Year 2008* DO - 10.14710/Jksa.11.2.43-47. <https://ejournal.undip.ac.id/index.php/ksa/article/view/3548>
- Velarde, L., Nikjoo, D., Escalera, E., & Akhtar, F. (2024). Bolivian natural zeolite as a low-cost adsorbent for the adsorption of cadmium: Isotherms and kinetics. *Heliyon*, 10(1), e24006. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24006>
- Nurianingsih, R., Sriatun, S., & Darmawan, A. (2019). Polyaniline Modified Natural Zeolite as Adsorbent for Chromium(III) Metal Ion. *Jurnal Kimia Sains Dan Aplikasi*, 22(6), 292-298. <https://doi.org/10.14710/jksa.22.6.292-298>
- Hailu, Y., Tilahun, E., Brhane, A., Resky, H., & Sahu, O. (2019). Ion exchanges process for calcium, magnesium and total hardness from ground water with natural zeolite. *Groundwater for Sustainable Development*, 8, 457-467. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.01.009>
- Cha, Y. H., & Lee, K. B. (2023). Examining the impact of different anions in Cu precursors on sulfur adsorption through zeolites with Cu ion-exchange. *Chemical Engineering Journal*, 468, 143461. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143461>
- Wicaksono, M. R., Handayani, I. P., Andiani, L., Chandra, I., Muminati, S. A., Wardhani, N. P. E. K., & Verasta, T. (2024). Molecular sieve 13X activated zeolite for CO₂ filter in air purifier. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2024.03.017>
- Qomaruzzaman, I., Sriatun, S., & Suhartana, S. (2020). NModifikasi Zeolit Alam menggunakan Trietanolamin (TEA) sebagai Adsorben Ion Logam Kromium (III) o Title. *Akta Kimia Indonesia*, 5(2), 62-75. <https://doi.org/10.12962/j25493736.v5i2.7807>
- Castellazzi, P., Notaro, M., Busca, G., & Finocchio, E. (2016). CO₂ capture by functionalized alumina sorbents: DiEthanolAmine on γ-alumina. *Microporous and Mesoporous Materials*, 226, 444-453. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2016.02.027>
- Sriatun, S., Susanto, H., Widayat, W., Darmawan, A., Sriyanti, S., Kurniasari, R., & Kurniawati, R. (2020). Synthesis of silica-rich zeolite using quaternary ammonium-based templates. *Journal of Physics: Conference Series*, 1524(1), 0-11. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1524/1/012087>
- Ma, Y.-K., Rigolet, S., Michelin, L., Paillaud, J.-L., Mintova, S., Khoerunnisa, F., Daou, T. J., & Ng, E.-P. (2021). Facile and fast determination of Si/Al ratio of zeolites using FTIR spectroscopy technique. *Microporous and Mesoporous Materials*, 311, 110683. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110683>
- Chatti, R., Bansiwala, A., Thote, J., Jha, V., Jadhav, P., Lokhande, S., Biniwale, R.,

Doi:

- Labhsetwar, N., & Rayalu, S. (2009). Amine Loaded Zeolites for Carbon Dioxide Capture: Amine Loading and Adsorption Studies. *Microporous and Mesoporous Materials*, 121, 84–89.
<https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2009.01.007>
16. Xiong, Y., Cui, X., Wang, D., Wang, Y., Lou, Z., Shan, W., & Fan, Y. (2019). Diethanolamine functionalized rice husk for highly efficient recovery of gallium(III) from solution and a mechanism study. *Materials Science and Engineering: C*, 99, 1115–1122.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msec.2019.02.028>
17. Taffarel, S. R., & Rubio, J. (2010). Adsorption of sodium dodecyl benzene sulfonate from aqueous solution using a modified natural zeolite with CTAB. *Minerals Engineering*, 23(10), 771–779.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.05.018>
18. Hamdan, H. (1992). *Introduction to zeolites: synthesis, characterization, and modification* (K. Universiti Teknologi Malaysia (ed.)).
19. Chen, G., Yang, L., Chen, J., Miki, T., Li, S., Bai, H., & Nagasaka, T. (2019). Competitive mechanism and influencing factors for the simultaneous removal of Cr(III) and Zn(II) in acidic aqueous solutions using steel slag: Batch and column experiments. *Journal of Cleaner Production*, 230, 69–79.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.402>
20. Motlagh Bahadory Esfahani, S., & Faghihian, H. (2014). Modification of synthesized β -zeolite by ethylenediamine and monoethanolamine for adsorption of Pb²⁺. *Journal of Water Process Engineering*, 3, 62–66.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2014.05.007>
21. Pearson, R. G. (1963). Hard and Soft Acids and Bases. *Journal of the American Chemical Society*, 85(22), 3533–3539.
<https://doi.org/10.1021/ja00905a001>