

Pengaruh aktivasi zeolit dan variasi waktu metode batch terhadap efektivitas adsorpsi ion logam besi

Suyanta, Sunarto, Susila Kristianingrum, Lalang Egalitera Pambayun

Universitas Negeri Yogyakarta, Indonesia

Corresponding Email: suyanta@uny.ac.id

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas tiga jenis zeolit, yaitu zeolit baru, zeolit jenuh, dan zeolit teraktivasi menggunakan asam sulfat 0,5 M dalam menyerap ion logam besi (Fe^{3+}) dari larutan limbah simulasi. Penelitian ini juga bertujuan untuk memahami pengaruh variasi waktu kontak (1 hingga 5 hari) terhadap efisiensi adsorpsi ion Fe^{3+} , serta membuktikan apakah proses aktivasi mampu meregenerasi kembali daya serap zeolit yang telah jenuh. Metode yang digunakan adalah metode batch berskala laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan rata-rata efisiensi zeolit teraktivasi mencapai 99,15%, Zeolit jenuh tanpa aktivasi menunjukkan penurunan kinerja signifikan dengan efisiensi rata-rata hanya 61,852%. Berdasarkan hasil uji anava menunjukkan nilai p-value 0,001 yang lebih kecil dari p-value tabel sebesar 0,005, maka ada perbedaan adsorpsi zeolit teraktivasi dan zeolit baru dengan zeolit jenuh. Hal ini mengindikasikan bahwa aktivasi oleh asam terhadap zeolit dapat secara efektif meregenerasi kapasitas adsorpsi dan memperpanjang umur pakai zeolit dalam pengolahan limbah kimia.

Kata kunci: *adsorpsi, aktivasi, batch, besi, zeolit*

The effect of zeolite activation and time variation of batch method on the adsorption effectiveness of iron metal ions

Abstract: This study aimed to evaluate the effectiveness of three types of zeolite, namely fresh zeolite, saturated zeolite, and zeolite activated using 0.5 M sulfuric acid, in adsorbing iron metal ions (Fe^{3+}) from simulated wastewater. It also examined the effect of contact time variations, ranging from 1 to 5 days, on Fe^{3+} adsorption efficiency and assessed whether the activation process could regenerate the adsorption capacity of saturated zeolite. The study employed a laboratory-scale batch method. The results showed that the average adsorption efficiency of activated zeolite reached 99.15%, while saturated zeolite without activation showed a significant decrease in performance, with an average efficiency of only 61.852%. The ANOVA test showed a p-value of 0.001, which was lower than the significance level of 0.005, indicating a significant difference in adsorption performance between activated and fresh zeolite compared with saturated zeolite. These findings indicate that acid activation can effectively regenerate zeolite adsorption capacity and extend its service life in chemical wastewater treatment.

Keywords: *adsorption, activation, batch, iron, zeolite*

How to Cite (APA 7th Style): Suyanta, S., Sunarto, S., Kristianingrum, S., & Pambayun, L. E. (2026). Pengaruh aktivasi zeolit dan variasi waktu metode batch terhadap efektivitas adsorpsi ion logam besi. *Jurnal Penelitian Saintek*, 31(1), 38–45. <https://doi.org/10.21831/jps.v30i1.91097>

PENDAHULUAN

Zeolit merupakan material aluminosilikat berstruktur kristalin yang memiliki kemampuan adsorpsi dan pertukaran ion yang tinggi, sehingga banyak dimanfaatkan sebagai adsorben untuk menghilangkan logam berat dari limbah cair (Riwu & Neolaka, 2021). Namun, kinerja zeolit alam cenderung menurun setelah penggunaan berulang akibat tersumbatnya pori-pori oleh pengotor yang menghambat akses ke situs aktif. Oleh karena itu, diperlukan proses aktivasi untuk meningkatkan kembali performa adsorpsi zeolit. Aktivasi kimia menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) diketahui mampu meningkatkan rasio Si/Al, memperbesar ukuran pori, serta membuka situs aktif baru, sehingga secara signifikan meningkatkan kapasitas adsorpsi zeolit (Margeta et al., 2013).

Ion logam besi (Fe^{3+}) merupakan salah satu kontaminan berbahaya yang umum ditemukan dalam limbah industri dan berpotensi mencemari lingkungan apabila tidak diolah secara tepat. Metode adsorpsi menggunakan zeolit teraktivasi menjadi alternatif yang menjanjikan karena relatif sederhana, ekonomis, dan ramah lingkungan dalam mengurangi konsentrasi ion Fe^{3+} dalam limbah cair (Asmorowati et al., 2023). Penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa aktivasi menggunakan H_2SO_4 lebih efektif dibandingkan HCl dalam meningkatkan kristalinitas serta kapasitas adsorpsi zeolit (Al Muttaqii et al., 2019).

Meskipun demikian, studi yang membandingkan secara langsung efektivitas zeolit baru, zeolit jenuh, dan zeolit teraktivasi terutama dengan mempertimbangkan variasi waktu kontak dalam sistem batch masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh aktivasi kimia dan variasi waktu kontak terhadap efektivitas adsorpsi ion Fe^{3+} . Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pengolahan limbah yang lebih efisien dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian Zeolit baru dan jenuh dicuci hingga bersih. Zeolit jenuh kemudian diaktivasi dengan perendaman H_2SO_4 0,5 M selama 24 jam, dicuci hingga pH netral, lalu dikeringkan pada suhu 100°C . Proses adsorpsi dilakukan dengan merendam masing-masing jenis zeolit (20 gram) ke dalam 50 mL larutan FeCl_3 10 ppm selama 1 hingga 5 hari. Larutan diaduk setiap hari, kemudian disaring. Sampel dianalisis konsentrasi ion Fe^{3+} sisa dengan AAS. Garis besar alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.

Konsentrasi ion Fe^{3+} diukur menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (AAS). Data konsentrasi dianalisis dengan menghitung efisiensi adsorpsi berdasarkan perbedaan konsentrasi awal dan akhir. Hasil ditampilkan dalam grafik hubungan jenis zeolit dan variasi waktu kontak dengan konsentrasi ion Fe^{3+} .



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

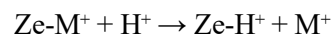
HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses aktivasi diawali dengan mencuci 200 gram zeolit di bawah air mengalir sampai pengotor yang menempel hilang, lalu dicuci kembali dengan akuades sampai benar-benar bersih. Zeolit yang sudah bersih kemudian direndam dengan H_2SO_4 0,5 M sebanyak 500 ml dalam beaker glass 2 L selama 24 jam. Selama proses aktivasi, beaker glass ditutup dengan plastic wrap untuk menghindari kontaminasi. Pada Gambar 2 di bawah ini, dapat dilihat bahwa setelah proses perendaman, warna zeolit berubah menjadi cenderung putih atau warna coklat memudar karena zat pengotor yang menempel pada zeolit telah luruh.



Gambar 2. Perendaman dan Kalsinasi Zeolit Jenuh

Secara kimia, proses pertukaran ion dalam aktivasi zeolit dengan asam sulfat ditunjukkan pada reaksi berikut:



Ze-M⁺ menunjukkan kerangka zeolit yang membawa kation logam seperti Na⁺ atau Ca²⁺, dan H⁺ berasal dari asam sulfat. Reaksi ini membuat zeolit menjadi lebih asam secara permukaan, yang sangat menguntungkan dalam proses adsorpsi kation logam karena ion H⁺ pada permukaan zeolit akan bertukar dengan ion logam seperti Fe³⁺ di dalam larutan (Ayele *et al.*, 2015).

Zeolit yang telah melalui proses perendaman kemudian dicuci dengan akuades sampai benar-benar bersih atau sampai mencapai pH netral. Proses pencucian ini sangat penting untuk menghilangkan sisa asam yang menempel pada zeolit. Jika pencucian tidak dilakukan secara menyeluruh, sisa asam dapat menyebabkan korosi peralatan, mempengaruhi pH sistem, dan menurunkan efisiensi adsorpsi (Motsi *et al.*, 2009).

Zeolit teraktivasi lalu dikalsinasi dengan menggunakan oven pada suhu 100°C selama 2 jam. Proses ini berfungsi untuk menghilangkan sisa air, termasuk air bebas dan air terikat, serta memperkuat struktur mikropori zeolit yang terbuka selama aktivasi kimia. Kalsinasi pada suhu ini juga membantu menstabilkan bentuk Ze-H⁺ yang terbentuk, tanpa merusak struktur kristalin zeolit. Suhu 100 °C tergolong moderat, sehingga tidak menyebabkan dekomposisi tetapi cukup untuk menghilangkan kelembaban dan memperbaiki kekuatan fisik partikel zeolit (Adymara *et al.*, 2016). Zeolit teraktivasi yang sudah kering dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kalsinasi Zeolit dengan Oven

Zeolit yang telah dikeringkan dapat digunakan untuk proses *batch* terhadap sampel. Perbandingan zeolit jenuh, zeolit baru, dan zeolit teraktivasi dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini.



Gambar 4. Zeolit Jenuh, Teraktivasi, Baru

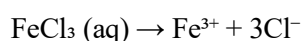
Pada gambar 4, terlihat bahwa zeolit teraktivasi memiliki warna dan bentuk yang hampir sama dengan zeolit baru. Hal ini menunjukkan bahwa proses aktivasi cukup efektif untuk meregenerasi zeolit jenuh menjadi zeolit teraktivasi yang dapat digunakan untuk proses adsorpsi kembali.

Zeolit hasil aktivasi selanjutnya digunakan dalam uji adsorpsi ion logam Fe³⁺ yang berasal dari larutan FeCl₃ 10 ppm. Tiga jenis zeolit digunakan untuk perendaman, yaitu zeolit baru (kontrol segar), zeolit jenuh (bekas penggunaan), dan zeolit teraktivasi (hasil aktivasi dari zeolit jenuh). Setiap jenis zeolit direndam dalam larutan FeCl₃ dengan variasi waktu perendaman selama 1 hingga 5 hari, menghasilkan total 15 botol sampel. Selama perendaman, larutan diaduk manual setiap hari untuk menjaga homogenitas dan memaksimalkan kontak antara ion logam dan permukaan zeolit. Proses perendaman dapat dilihat pada Gambar 5 di bawah ini.

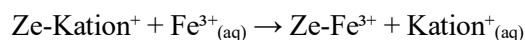


Gambar 5. Perendaman Sampel dengan Zeolit

Reaksi pertama yang terjadi adalah FeCl_3 terdisosiasi sempurna menjadi ion (Petrucci *et al.*, 2017):



Zeolit memiliki struktur kristalin aluminosilikat yang mengandung situs bermuatan negatif akibat substitusi atom $\text{Si}^{4+} \rightarrow \text{Al}^{3+}$ dalam kerangka silika. Untuk menjaga netralitas muatan, rongga zeolit terisi oleh kation yang mudah ditukar (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). Berdasarkan hal tersebut, terjadi reaksi pertukaran ion, dimana ion Fe^{3+} akan menggantikan kation yang berada dalam rongga zeolit (Peng & Wang, 2010).



Sampel yang telah melalui proses perendaman dengan zeolit kemudian dianalisis konsentrasi Fe^{3+} sisa dengan Spektrofotometer Serapan Atom. Pengukuran sampel pada tiap jenis zeolit dan kontak waktu diulang sebanyak 10 kali pembacaan. Data rata-rata konsentrasi Fe^{3+} pada sampel setelah perlakuan *batch* dapat dilihat pada Tabel 1 di bawah ini

Tabel 1. Rerata Konsentrasi Ion Fe^{3+} Sisa (ppm) pada Tiga Kondisi Zeolit

Hari Ke-	Zeolit Baru	Zeolit Jenuh	Zeolit Teraktivasi
1	0,085	3,997	0,011
2	0,120	3,536	0,240
3	0,020	4,189	0,106
4	$\approx 0,00$	3,426	0,049
5	$\approx 0,00$	3,923	0,021

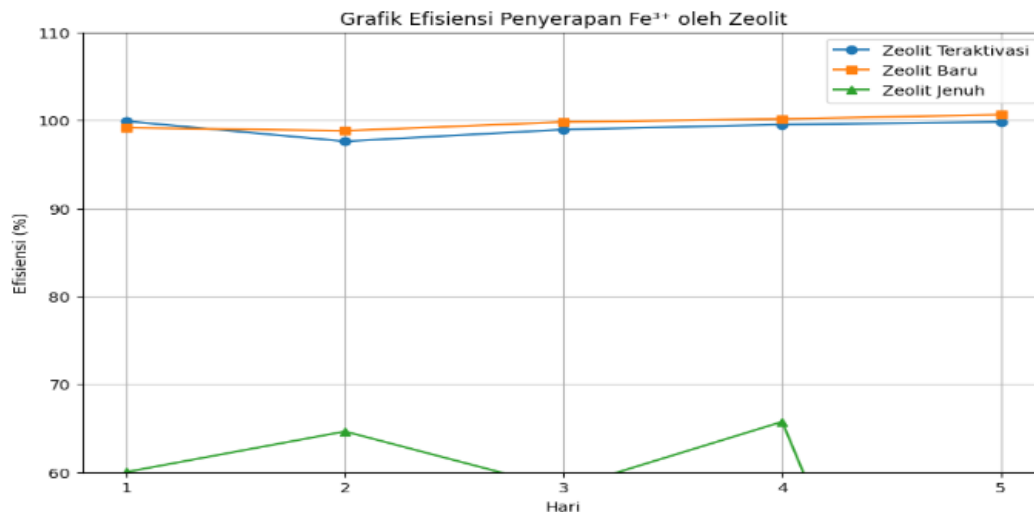
Dari data di atas, didapatkan persen efisiensi penyerapan tiap zeolit yang tertera pada Tabel 2 di bawah ini dengan rumus:

$$\text{Efisiensi (\%)} = \frac{\text{Selisih konsentrasi}}{\text{Konsentrasi awal}} \times 100$$

Tabel 2. Efisiensi Adsorpsi Zeolit

Hari	Efisiensi Teraktivasi (%)	Zeolit (%)	Efisiensi Zeolit Baru	Efisiensi Zeolit Jenuh (%)
1	99,89		99,15	60,03
2	97,60		98,80	64,64
3	98,94		99,80	58,11
4	99,51		100,15	65,74
5	99,80		100,63	6,077
Rata-rata	99,15		99,55	61,85

Berdasarkan data di atas, dapat dilihat bahwa rata-rata efisiensi tertinggi dimiliki oleh zeolit baru yaitu sebesar 99,55%. Zeolit teraktivasi juga memiliki kemampuan adsorpsi yang sangat bagus yaitu sebesar 99,15%, dimana persen efisiensi tersebut hanya 0,4% lebih kecil dari persen efisiensi zeolit baru. Zeolit jenuh memiliki nilai persen efisiensi penyerapan terendah yaitu 61,85%.

**Gambar 6. Grafik Efisiensi Adsorpsi Zeolit**

Grafik pada Gambar 6 mengonfirmasi pola pada Tabel 2, di mana zeolit teraktivasi dan zeolit baru secara konsisten menunjukkan efisiensi adsorpsi yang tinggi (97–100%), sedangkan zeolit jenuh berada pada kisaran yang lebih rendah dan fluktuatif (58–65%). Pola ini menegaskan bahwa kondisi fisikokimia dan proses aktivasi kimia memiliki pengaruh signifikan terhadap kinerja adsorpsi ion Fe^{3+} . Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa aktivasi asam pada zeolit mampu meningkatkan kapasitas adsorpsi melalui pembukaan pori dan peningkatan jumlah situs aktif (Margeta et al., 2013; Al Muttaqii et al., 2019).

Dinamika pengaruh waktu kontak menunjukkan bahwa proses adsorpsi tidak berlangsung secara linear. Zeolit teraktivasi dan zeolit baru mempertahankan efisiensi tinggi yang relatif stabil sepanjang waktu kontak, sementara zeolit jenuh mengalami fluktuasi yang lebih signifikan. Fenomena ini mengindikasikan bahwa meskipun waktu kontak berperan dalam meningkatkan interaksi antara adsorben dan adsorbat, faktor lain seperti ketersediaan situs aktif dan kondisi permukaan adsorben memiliki peran yang lebih dominan. Temuan ini konsisten dengan studi yang menunjukkan bahwa sebagian besar ion logam teradsorpsi pada tahap awal melalui interaksi permukaan, sehingga peningkatan waktu kontak tidak selalu menghasilkan peningkatan efisiensi yang signifikan (Bakalár et al., 2020).

Secara kuantitatif, zeolit teraktivasi menunjukkan efisiensi tinggi dan relatif stabil dengan rata-rata sebesar 99,15%, sedangkan zeolit baru memiliki kinerja sedikit lebih tinggi (99,55%). Sebaliknya, zeolit jenuh menunjukkan penurunan performa yang signifikan dengan efisiensi yang fluktuatif. Hasil ini memperkuat temuan penelitian lain bahwa aktivasi asam efektif dalam meregenerasi kapasitas adsorpsi zeolit bekas pakai serta mengembalikan performanya mendekati kondisi awal (Riwu & Neolaka, 2021). Selain itu, nilai efisiensi yang mendekati 99% juga sejalan dengan penelitian lain pada adsorpsi ion Fe^{3+} menggunakan zeolit teraktivasi, yang menunjukkan efektivitas tinggi dalam kondisi optimal (Asmorowati et al., 2023).

Pola fluktuatif pada zeolit jenuh serta ketidaklinieran peningkatan efisiensi terhadap waktu kontak dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme, antara lain saturasi situs aktif, hambatan difusi intrapartikel, serta kompetisi antar ion dalam larutan. Studi terdahulu menunjukkan bahwa dalam sistem adsorpsi, kompetisi antar ion dapat menyebabkan desorpsi parsial, di mana ion yang telah terikat dapat terlepas kembali akibat interaksi dengan ion lain atau perubahan kondisi lingkungan (Foldesova et al., 2006). Selain itu, kondisi asam juga dapat memicu kompetisi antara ion Fe^{3+} dan H^+ , yang berkontribusi terhadap penurunan efisiensi adsorpsi pada waktu tertentu.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi efektivitas aktivasi kimia dalam meningkatkan kinerja adsorpsi zeolit, tetapi juga menunjukkan bahwa stabilitas efisiensi adsorpsi lebih ditentukan oleh kondisi material dibandingkan oleh lamanya waktu kontak. Dengan demikian, optimasi adsorben melalui aktivasi menjadi faktor kunci dalam meningkatkan efisiensi pengolahan limbah logam berat.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, zeolit teraktivasi menggunakan larutan H_2SO_4 0,5 M menunjukkan efisiensi adsorpsi ion Fe^{3+} yang tinggi dengan rata-rata sebesar 99,15% selama lima hari waktu kontak. Zeolit baru memiliki kinerja terbaik dengan efisiensi maksimum sebesar 99,55%, sedangkan zeolit jenuh tanpa aktivasi menunjukkan penurunan kinerja yang signifikan dengan efisiensi rata-rata sebesar 61,85%. Temuan ini menegaskan bahwa aktivasi kimia efektif dalam meregenerasi zeolit bekas pakai, meningkatkan kapasitas adsorpsi, serta memperpanjang umur guna adsorben. Dengan demikian, penggunaan zeolit teraktivasi berpotensi menjadi metode pengolahan limbah cair logam berat yang lebih optimal, ekonomis, dan berkelanjutan. Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan dilakukan karakterisasi material secara komprehensif serta pengujian variasi kondisi adsorpsi guna memperkuat analisis kuantitatif. Selain itu, studi mengenai regenerasi berulang dan penerapan pada sistem kontinu perlu dilakukan untuk memastikan efektivitas dan keberlanjutan penggunaan zeolit pada skala industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Adymara, Wijaya, K., Trisunaryanti, W., & Mudasir. (2016). *Preparasi dan karakterisasi fisiko-kimia zeolit teraktivasi asam sulfat dan bentonit berpilar alumina dengan teknik kalsinasi gelombang mikro*. Universitas Gadjah Mada.
- Al Muttaqii, M., Birawidha, D. C., Isnugroho, K., Amin, M., Hendronursito, Y., & Istiqomah, A. D. (2019). Pengaruh aktivasi secara kimia menggunakan larutan asam dan basa terhadap karakteristik zeolit alam. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Asmorowati, D. S., Kristanti, I. I., & Sumarti, S. S. (2023). Adsorpsi logam Fe pada limbah menggunakan zeolit alam teraktivasi asam sulfat. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 12(1), 16–21.
- Ayele, L., Pérez-Pariente, J., Chebude, Y., & Díaz, I. (2015). Synthesis of zeolite A from Ethiopian kaolin. *Microporous and Mesoporous Materials*, 215, 29–36. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2015.05.022>
- Foldesova, M., Balintova, M., & Holub, M. (2006). Influence of pH and temperature on desorption processes in water treatment. *Chemosphere*, 64(5), 856–865. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.10.041>
- Margeta, K., Živanović, M., Logar, N. Z., & Farkaš, A. (2013). Natural zeolites in water treatment: How effective is their use. *Procedia Engineering*, 57, 118–126.

- <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.018>
- Motsi, T., Rowson, N. A., & Simmons, M. J. H. (2009). Adsorption of heavy metals from acid mine drainage by natural zeolite. *International Journal of Mineral Processing*, 92(1–2), 42–48. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.03.001>
- Peng, Y., & Wang, S. B. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156, 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.029>
- Petrucchi, R. H., Herring, F. G., Madura, J. D., & Bissonnette, C. (2017). *General chemistry: Principles and modern applications* (11th ed.). Pearson Education.
- Riwu, K. D., & Neolaka, Y. A. (2021). Sintesis dan karakterisasi zeolit alam termodifikasi untuk adsorpsi ion logam berat dari limbah cair. *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, 24(2), 45–52.