

Pemanfaatan zeolit alam sebagai adsorben logam berat dalam air limbah industri

Ziadatun Shochichah Nuairoh

Program Studi kimia, Universitas Maulana Malik Ibrahim Malang
e-mail: 230603110007@student.uin-malang.ac.id

Kata Kunci:

zeolit alam; logam berat;
adsorpsi; pengolahan air limbah;
pencemaran lingkungan.

Keywords:

Natural zeolite; heavy metal;
adsorption; wastewater
treatment; environmental
pollution.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi dan efektivitas zeolit alam sebagai adsorben logam berat dalam pengolahan air limbah industri. Topik ini sangat penting karena limbah industri yang mengandung logam berat dapat mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia. Artikel ini menggunakan metode tinjauan pustaka (literature review) dengan menganalisis lima jurnal nasional dan internasional yang relevan. Setiap jurnal dievaluasi berdasarkan kandungan materi mengenai karakteristik zeolit, mekanisme adsorpsi, jenis logam berat, serta metode aktivasi dan aplikasi di lapangan. Data dikaji secara deskriptif dan disajikan dalam bentuk narasi dan tabel. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa zeolit memiliki kapasitas yang tinggi dalam menyerap logam berat seperti timbal, krom, dan besi, serta berpotensi sebagai solusi ramah lingkungan untuk pengolahan limbah industri.

ABSTRACT

This study aims to explore the potential and effectiveness of natural zeolite as an adsorbent for heavy metals in industrial wastewater treatment. This topic is crucial, as heavy metal contamination from industrial waste poses serious risks to the environment and human health. The article adopts a literature review method by analyzing five national and international journals relevant to the topic. Each journal is evaluated based on content related to zeolite characteristics, adsorption mechanisms, types of heavy metals, activation methods, and real-world applications. The data are described narratively and presented in tables. The review shows that zeolite has a high capacity to adsorb heavy metals such as lead, chromium, and iron, making it a promising and eco-friendly solution for industrial wastewater management.

Pendahuluan

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh limbah industri merupakan salah satu isu krusial di berbagai negara, termasuk Indonesia (M Faza Nanda et al., 2024). Air limbah industri umumnya mengandung berbagai bahan pencemar berbahaya seperti logam berat, senyawa organik kompleks, dan senyawa kimia toksik lainnya yang sulit terurai secara alami. Logam berat seperti timbal (Pb), besi (Fe), kromium (Cr), tembaga (Cu), dan seng (Zn) diketahui memiliki efek karsinogenik, mutagenik, dan toksik terhadap makhluk hidup bahkan pada konsentrasi yang sangat rendah. Dalam laporan oleh (SRI SEPTI DYAH PRATIWI, 2021) disebutkan bahwa limbah dari industri pengolahan makanan dan gula yang dibuang ke badan air menyebabkan peningkatan kadar BOD, COD, fosfor, dan keasaman air melebihi baku mutu yang ditetapkan, sehingga berdampak negatif terhadap ekosistem sungai dan kesehatan masyarakat. Hal ini



This is an open access article under the CC BY-NC-SA license.

Copyright © 2023 by Author. Published by Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

menunjukkan betapa gentingnya permasalahan pengelolaan air limbah industri di Indonesia dan perlunya solusi pengolahan limbah yang tidak hanya efektif tetapi juga ekonomis dan ramah lingkungan.

Artikel ini bertujuan untuk membahas pemanfaatan zeolit alam sebagai salah satu solusi pengolahan air limbah industri, khususnya untuk menurunkan kandungan logam berat di dalamnya. Pemilihan topik ini didasarkan pada berbagai penelitian yang telah membuktikan efektivitas zeolit sebagai adsorben alami untuk menyerap ion logam berat dari limbah cair industri, baik dalam skala laboratorium maupun aplikasi lapangan. Dengan membandingkan data dari beberapa studi sebelumnya, artikel ini juga bertujuan untuk merangkum parameter operasional optimum yang memengaruhi kinerja adsorpsi oleh zeolit, seperti pH, waktu kontak, aktivasi permukaan, dan dosis adsorben. Zeolit alam dipilih sebagai solusi potensial dalam pengolahan limbah cair industri karena karakteristik uniknya. Zeolit merupakan mineral alami yang tersusun dari kerangka silika-alumina dengan struktur pori tiga dimensi. Struktur tersebut menjadikan zeolit memiliki luas permukaan spesifik yang besar, sifat penukar kation yang tinggi, serta kestabilan termal dan kimia yang baik.

Dalam penelitian oleh (Elysabeth & Jufrodi, 2015) zeolit alam yang diaktivasi terbukti mampu menurunkan kadar logam berat seperti Fe dan Pb secara signifikan dari limbah TPA Cilowong, dengan efisiensi optimal terjadi pada suhu 50°C dan waktu kontak 90 menit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa efektivitas zeolit dapat ditingkatkan melalui proses aktivasi kimia maupun termal. Misalnya, zeolit yang diaktivasi dengan larutan HNO₃ atau NaOH menunjukkan peningkatan daya serap terhadap ion logam berat seperti Cr dan Fe. Selain itu, kombinasi zeolit dengan media filtrasi lain atau sistem adsorpsi bertingkat dapat meningkatkan efisiensi pengolahan limbah. Lebih lanjut, penelitian terbaru yang menggunakan zeolit-A hasil sintesis dari limbah nipah dan aluminium kaleng menunjukkan bahwa zeolit juga dapat dikembangkan dari limbah lokal sebagai upaya substitusi bahan baku komersial. Adsorben ini mampu menurunkan kadar logam Cr hingga 17,74% dalam waktu kontak 150 menit. Dengan berbagai keunggulan tersebut—harga yang murah, ketersediaan yang melimpah di alam, dan efektivitasnya dalam menyerap logam berat—zeolit menjadi solusi potensial dan relevan dalam pengolahan air limbah industri. Penggunaan zeolit dalam sistem pengolahan limbah memberikan pendekatan yang mendukung prinsip teknologi ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Pembahasan

Masalah pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh air limbah industri, terutama yang mengandung logam berat, merupakan salah satu tantangan terbesar dalam pengelolaan sumber daya air di Indonesia. Air limbah yang tidak diolah dengan benar dapat mencemari badan air seperti sungai dan danau, merusak ekosistem, serta mengancam kesehatan masyarakat. Logam berat dalam limbah cair bersifat toksik, persisten, dan mudah terakumulasi dalam tubuh organisme, sehingga dapat menimbulkan efek jangka panjang seperti gangguan sistem saraf, kerusakan organ, bahkan kanker. Seiring meningkatnya kesadaran terhadap pentingnya pengolahan limbah secara ramah lingkungan, muncul berbagai teknologi alternatif yang dapat

digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Salah satu teknologi yang banyak diteliti dan dikembangkan adalah penggunaan zeolit alam sebagai adsorben logam berat. Zeolit memiliki struktur berpori dan kemampuan tukar kation yang menjadikannya ideal untuk menangkap ion logam dalam air limbah. Penggunaan zeolit dalam pengolahan air limbah telah diteliti oleh berbagai kalangan akademisi. Dalam penelitian (Elysabeth & Jufrodi, 2015) zeolit alam dari Bayah yang telah diaktivasi mampu menyerap ion Fe dan Pb secara signifikan dari limbah TPA Cilowong. Adsorpsi optimum tercapai pada suhu 50°C dan waktu kontak 90 menit.

Studi lain oleh (Pida Renni et al., 2018) menunjukkan bahwa zeolit yang diaktivasi dengan HNO₃ memiliki kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi terhadap Fe(III) dan Cr(VI) dibanding zeolit alam biasa. Bahkan, inovasi terbaru dari menunjukkan potensi zeolit-A sintetis dari limbah nipah dan aluminium kaleng sebagai adsorben logam berat, yang menambah nilai ekonomis dan lingkungan dari limbah domestik. Dengan latar belakang tersebut, pembahasan ini akan mengulas lebih lanjut mengenai karakteristik zeolit, mekanisme adsorpsi logam berat, jenis-jenis logam berat dalam air limbah, metode aktivasi zeolit, serta tantangan dan peluang pengembangan aplikasi zeolit dalam skema pengolahan limbah industri. Pembahasan juga mencakup hasil-hasil penelitian yang mendukung penggunaan zeolit sebagai solusi praktis dan berkelanjutan dalam bidang lingkungan.

Karakteristik dan Jenis Zeolit

Zeolit adalah mineral aluminosilikat berpori yang memiliki struktur tiga dimensi tersusun dari tetrahedral [sio₄]⁴⁻ dan [alo₄]⁵⁻, terhubung oleh atom oksigen. Struktur ini menghasilkan rongga dan kanal mikropori yang memungkinkan zeolit untuk menyerap molekul kecil serta bertindak sebagai penukar ion. Secara umum, zeolit terbagi dalam dua jenis, yaitu zeolit alam dan zeolit sintetis. Zeolit alam banyak ditemukan di Indonesia seperti di Bayah, Lampung, dan Gunung Kidul, sementara zeolit sintetis seperti zeolit-A dapat direkayasa dari limbah organik dan anorganik. Sifat-sifat fisik dan kimia zeolit yang mendukung fungsinya sebagai adsorben antara lain luas permukaan spesifik tinggi, kapasitas tukar kation (KTK), porositas yang baik, serta kestabilan termal dan kimia. Dalam penelitian (Putri et al., 2024), zeolit-A hasil sintesis dari limbah daun nipah dan kaleng aluminium menunjukkan kemampuan pertukaran kation yang tinggi, menjadikannya adsorben yang efisien untuk ion logam berat seperti Cr.

Mekanisme Adsorpsi Logam Berat

Mekanisme adsorpsi logam berat oleh zeolit berlangsung melalui dua cara, yaitu secara fisik dan kimia. Proses ini melibatkan pertukaran ion, penyaringan molekuler (sieving), serta pembentukan ikatan elektrostatik antara gugus fungsional pada permukaan zeolit dengan ion logam. Efektivitas mekanisme ini sangat tergantung pada karakteristik struktur zeolit, termasuk ukuran pori dan muatan permukaannya. Efisiensi adsorpsi logam berat oleh zeolit dipengaruhi oleh beberapa faktor penting. Faktor pertama adalah ph, yang menentukan bentuk spesiasi logam dan muatan permukaan zeolit; adsorpsi logam Fe(III) dan Cr(VI) biasanya paling efektif pada rentang ph 2 hingga 8, tergantung pada jenis zeolit yang digunakan. Faktor kedua adalah waktu kontak, di mana waktu yang cukup dibutuhkan agar sistem mencapai kesetimbangan adsorpsi,

dengan waktu optimum berkisar antara 90 hingga 150 menit berdasarkan hasil penelitian. Faktor ketiga adalah suhu, yang berpengaruh terhadap kecepatan difusi dan reaktivitas kimia; pada suhu sekitar 50°C, proses adsorpsi ion Fe menunjukkan efisiensi maksimum.

Jenis Logam Berat dalam Air Limbah

Air limbah industri sering mengandung logam berat seperti timbal (Pb), besi (Fe), kromium (Cr), tembaga (Cu), dan seng (Zn). Logam-logam ini berasal dari industri elektroplating, batik, pengolahan makanan, dan tekstil. Kromium heksavalen (Cr^{6+}) diketahui bersifat karsinogenik, sementara timbal dapat menyebabkan gangguan sistem saraf dan pertumbuhan anak. Selain mencemari air, logam berat juga terakumulasi dalam organisme hidup dan mengganggu rantai makanan.

Metode Aktivasi dan Modifikasi Zeolit

Zeolit alam umumnya mengandung berbagai pengotor seperti natrium (Na), kalium (K), dan kalsium (Ca) yang dapat menurunkan efisiensi adsorpsinya. Oleh karena itu, diperlukan proses aktivasi untuk meningkatkan daya adsorpsi zeolit. Terdapat tiga metode utama dalam proses aktivasi ini. Pertama, aktivasi fisik dilakukan dengan cara pemanasan pada suhu tinggi yang bertujuan untuk membuka pori-pori zeolit dan menghilangkan air yang terikat di dalamnya. Kedua, aktivasi kimia dilakukan dengan menggunakan larutan asam seperti HCl atau HNO_3 guna menghilangkan kation pengotor serta meningkatkan kristalinitas zeolit. Ketiga, aktivasi termal melibatkan proses pengeringan dan kalsinasi pada suhu antara 200 hingga 400°C untuk memperkuat struktur pori-pori zeolit. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Pida Renni et al., 2018), zeolit yang diaktivasi menggunakan HNO_3 menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih baik dan mengikuti pola isoterm Langmuir, yang mengindikasikan terjadinya adsorpsi monolayer secara teratur pada permukaan zeolit.

Aplikasi Zeolit dalam Pengolahan Air Limbah

Zeolit telah digunakan dalam berbagai sistem pengolahan air limbah baik secara batch maupun kontinyu. Studi oleh (Elysabeth & Jufrodi, 2015) menggunakan zeolit Bayah teraktivasi untuk menurunkan kadar Fe dan Pb dari air limbah TPA, dengan hasil terbaik pada 90 menit kontak dan suhu 50°C. Sementara itu, zeolit-A dari limbah nipah dan aluminium kaleng menunjukkan efisiensi penurunan Cr sebesar 17,74% pada kontak 150 menit. Penggunaan zeolit dalam sistem pengolahan air limbah memberikan manfaat lingkungan seperti pengurangan toksitas air limbah dan pemulihian ekosistem serta manfaat ekonomi karena bahan ini murah dan mudah didapat.

Penerapan dan inovasi penggunaan zeolit dalam pengolahan air limbah

Penggunaan zeolit sebagai adsorben logam berat dalam pengolahan air limbah industri telah banyak diuji melalui studi-studi aplikatif di berbagai sektor. Salah satu studi yang relevan adalah penelitian oleh Tiur (Elysabeth & Jufrodi, 2015) yang mengkaji pemanfaatan zeolit alam Bayah teraktivasi dalam menyerap logam berat Fe dan Pb dari air limbah TPA Cilowong. Dalam studi ini, zeolit diaktivasi menggunakan larutan HCl dan dipanaskan untuk meningkatkan kristalinitas dan kemampuan adsorpsi. Proses adsorpsi dilakukan dalam berbagai variasi suhu (40°C, 50°C, dan 60°C) dan waktu kontak hingga

120 menit. Hasilnya menunjukkan bahwa zeolit paling efektif menyerap logam berat pada suhu 50°C dan waktu kontak 90 menit. Pada kondisi tersebut, terjadi penurunan signifikan kadar Fe dalam air limbah. Meskipun konsentrasi Pb dalam sampel relatif rendah (<10 mg/L), zeolit tetap menunjukkan kemampuan adsorpsi yang baik. Penelitian ini membuktikan bahwa zeolit alam yang telah diaktivasi dapat digunakan secara efektif untuk mengolah limbah cair yang mengandung logam berat, dengan potensi penerapan di fasilitas pengolahan limbah terpadu.

Studi lain oleh (Pida Renni et al., 2018) menunjukkan aplikasi zeolit alam Gunung Kidul yang diaktivasi dengan HNO₃ dalam menyerap ion Fe(III) dan Cr(VI) dari air limbah elektroplating. Zeolit yang telah dikalsinasi pada suhu 400°C menunjukkan kapasitas adsorpsi yang lebih tinggi dibandingkan zeolit tanpa aktivasi. Pada kondisi optimum (ph 2–4, waktu kontak 120–150 menit), terjadi penurunan kadar logam berat secara signifikan. Penelitian ini memperkuat fakta bahwa metode aktivasi kimia memberikan peningkatan signifikan pada efektivitas zeolit alam sebagai adsorben. Inovasi dalam pemanfaatan zeolit terus berkembang untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan teknologi pengolahan limbah. Salah satu inovasi menarik ditunjukkan oleh (Putri et al., 2024) dalam penelitiannya mengenai zeolit-A sintetis yang dibuat dari limbah daun nipah dan aluminium kaleng. Zeolit-A ini disintesis dengan rasio molar Si/Al sebesar 1,9 dan proses hidrotermal, menghasilkan adsorben dengan struktur kristal yang stabil dan kapasitas tukar kation tinggi.

Zeolit-A hasil sintesis digunakan untuk menyerap logam berat kromium (Cr) dari air limbah sisa analisis COD laboratorium. Pada variasi waktu kontak (30–150 menit), efisiensi adsorpsi tertinggi tercapai pada 150 menit dengan pengurangan kadar Cr mencapai 17,74%. Meskipun efisiensi ini belum mencapai tingkat maksimal, penelitian ini memberikan inovasi penting dalam hal pemanfaatan limbah organik dan anorganik menjadi material bernilai tinggi, sekaligus mendukung prinsip ekonomi sirkular. Lebih jauh, penelitian ini menggunakan pendekatan kinetika adsorpsi, termasuk model orde nol dan orde dua semu, untuk memodelkan laju dan kapasitas adsorpsi. Pendekatan ini membuka jalan bagi optimalisasi desain proses pengolahan limbah berbasis zeolit dalam skala industri. Kombinasi teknologi zeolit dengan metode pemodelan kinetika dan penggunaan bahan baku lokal menjadikan inovasi ini sangat relevan dengan kebutuhan pengelolaan lingkungan yang efisien dan murah. Secara umum, baik penggunaan zeolit alami teraktivasi maupun zeolit sintetis dari limbah menunjukkan bahwa teknologi ini bukan hanya efektif, tetapi juga fleksibel dan ekonomis. Perkembangan inovasi ini membuka peluang besar untuk diterapkan di sektor industri, pertanian, maupun pengolahan limbah domestik dalam skala menengah ke bawah.

Kesimpulan dan Saran

Pemanfaatan zeolit alam sebagai adsorben logam berat dalam air limbah industri terbukti menjadi alternatif yang efektif, ekonomis, dan ramah lingkungan. Zeolit, baik dalam bentuk alami maupun hasil sintesis, memiliki struktur berpori dan kapasitas tukar kation tinggi yang memungkinkan penyerapan ion logam seperti Fe, Pb, dan Cr secara signifikan. Aktivasi zeolit, baik secara kimia (menggunakan HCl atau HNO₃) maupun termal, mampu meningkatkan kristalinitas dan efektivitas adsorpsi. Hasil studi

menunjukkan bahwa kondisi optimum proses adsorpsi sangat dipengaruhi oleh parameter seperti pH, suhu, waktu kontak, dan dosis adsorben. Studi kasus yang dikaji, seperti penggunaan zeolit Bayah untuk limbah TPA dan zeolit-A sintesis dari limbah nipah dan aluminium kaleng, menunjukkan keberhasilan dalam menurunkan kadar logam berat dan membuka peluang pemanfaatan limbah lokal sebagai bahan baku zeolit. Diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan kombinasi zeolit dengan teknologi lain seperti karbon aktif atau sistem filtrasi bertingkat guna meningkatkan efisiensi adsorpsi. Industri juga perlu didorong untuk mengadopsi teknologi ini melalui insentif atau regulasi lingkungan yang lebih ketat. Selain itu, edukasi tentang potensi zeolit lokal dan teknologi aktivasi sederhana dapat meningkatkan kesadaran masyarakat dan sektor industri kecil terhadap pentingnya pengelolaan limbah berbasis teknologi hijau.

Daftar Pustaka

- Elysabeth, T., & Jufrodi, H. (2015). Adsorbsi Logam Berat Besi dan Timbal Menggunakan Zeolit Alam Bayah Teraktivasi. In *Jurnal Chemtech* (Vol. 1).
- M Faza Nanda, Syahrul Maulanah, Tiara Nur Hidayah, Aldi Maulana Taufiqurrahman, & Denny Oktavino Radianto. (2024). Analisis Pentingnya Pengelolaan Limbah Terhadap Kehidupan Sosial Bermasyarakat. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(2), 97–107. <https://doi.org/10.61132/venus.v2i2.255>
- Pida Renni, C., Widhi Mahatmanti, F., & Nuni Widiarti, dan. (2018). Indonesian Journal of Chemical Science Pemanfaatan Zeolit Alam Teraktivasi sebagai Adsorben Ion Logam Fe(III) dan Cr(VI). In *J. Chem. Sci* (Vol. 7, Issue 1). <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>
- Putri, A. N. R., Fadlilah, I., & Prasadi, O. (2024). Pemanfaatan Zeolit-A Sebagai Adsorben Logam Berat Kromium Total (Cr) Pada Limbah Cair Sisa Analisis Chemical Oxygen Demand (COD). *Ruwa Jurai: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 18(1), 33–40. <https://doi.org/10.26630/rj.v18i1.4424>
- SRI SEPTI DYAH PRATIWI. (2021). ANALISIS DAMPAK SUMBER AIR SUNGAI AKIBAT PENCEMARAN PABRIK GULA DAN PABRIK PEMBUATAN SOSIS. *Journal of Research and Education Chemistry*, 3(2), 122. [https://doi.org/10.25299/jrec.2021.vol3\(2\).7774](https://doi.org/10.25299/jrec.2021.vol3(2).7774)