

# Sintesis dan Karakterisasi Zeolit Y dari Pasir Vulkanik Gunung Soputan dengan Metode Hidrotermal sebagai Adsorben Logam Berat Timbal (Pb)

Dwi Putra Wijaya<sup>1\*</sup>, Harry S. J. Koleangan<sup>1</sup>, Nurharis Munandar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sam Ratulangi Manado

\*Email korespondensi: D.Putra.w@unsrat.ac.id

## ABSTRAK

Telah dilakukan sintesis Zeolit Y secara hidrotermal berbasis pasir vulkanik Gunung Soputan. Hasil ekstraksi dan pengujian XRF menunjukkan ekstrak silika (SiO<sub>2</sub>) yang didapatkan dari pasir vulkanik Gunung Soputan memiliki kemurnian sebesar 92.37%. Pengujian karakterisasi dari Zeolit Y berdasarkan hasil XRD dan citra SEM menunjukkan munculnya peak pada  $2\theta = 6^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 23^\circ, \text{ dan } 27^\circ$  dengan spesifik sudut  $2\theta = 6^\circ$  [111] yang menunjukkan karakteristik Zeolite Y. Citra SEM menunjukkan tekstur permukaan material Zeolite Y yang cukup teratur dengan ukuran kristal 1-10  $\mu\text{m}$  yang mengimplikasikan telah terbentuknya material Zeolit Y yang baik. Kemampuan Adsorpsi dari Zeolit Y terhadap logam berat Pb pada variasi waktu kontak 40, 50, dan 60 menit, memiliki nilai masing-masing 79, 85,5, 93%. Kemampuan pemakaian kembali (*lifetime*) Zeolit Y yang didapat setelah tiga kali pemakaian. Menunjukkan kapasitas adsorpsi Zeolit Y menurun. Kemampuan adsorpsi setelah 3 kali pemakaian ulang yaitu sebesar 51%, 46,5%, dan 34,5% dengan nilai  $y = -1,65x + 12,1$  dengan  $R^2 = 0,9356$ .

Kata Kunci: Pasir vulkanik, Gunung Soputan, Zeolit Y, Adsorben, Logam berat Pb

## ABSTRACT

The synthesis of Y Zeolite was carried out hydrothermally using volcanic sand from Mount Soputan. The extraction and XRF testing results showed that the silica (SiO<sub>2</sub>) obtained from the volcanic sand of Mount Soputan had a purity of 92.37%. Characterization tests of the Y Zeolite, based on XRD results and SEM images, revealed peaks at  $2\theta = 6^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 23^\circ, \text{ and } 27^\circ$ , with specific angles at  $2\theta = 6^\circ$  [111], which are characteristic of Y Zeolite. SEM images demonstrated a relatively regular surface texture of the Y Zeolite material with crystal particle sizes around 1-10  $\mu\text{m}$ , indicating the formation of high-quality Y Zeolite material. The adsorption capacity of Y Zeolite for heavy metal Pb at contact times of 40, 50, and 60 minutes was 79%, 85.5%, and 93%, respectively. The reusability (*lifetime*) of Y Zeolite, after three cycles of use, showed a decrease in adsorption capacity. After three uses, the adsorption capacity was 51%, 46.5%, and 34.5%, with the regression equation  $y = -1,65x + 12,1$  and  $R^2 = 0,9356$ .

Keywords: Volcanic Sand, Mount Soputan, Y Zeolite, Adsorbent, Heavy Metal Pb

## PENDAHULUAN

Limbah logam Pb terlepas di lingkungan merupakan limbah yang bersifat toksik, Ion-ion logam berat Pb pada umumnya merupakan polutan yang dapat merusak lingkungan sehingga sangat perlu mendapat perhatian khusus. Logam ini berbahaya karena cenderung berakumulasi dalam jaringan tubuh manusia dan menimbulkan berbagai gangguan kesehatan (Kristiyani dkk., 2012).

Usaha-usaha penanganan limbah logam berat ini telah banyak dilakukan untuk mengatasi hal tersebut. Salah satunya dengan menggunakan material adsorben. Salah satu jenis adsorben yang mudah didapat dan memiliki berbagai macam keunggulan adalah Zeolit. Zeolit merupakan mineral alumina silikat terhidrat yang tersusun atas komponen utama tetrahedral-tetrahedral alumina (Al) dan silika (Si) yang membentuk struktur bermuatan negatif dan berongga terbuka/berpori (Tinaiy dkk., 2020).

Sebagian besar wilayah Indonesia memiliki banyak Gunung berapi yang berpotensi besar menjadi sumber terbentuknya material yang mengandung mineral yang cukup tinggi seperti pada pasir vulkanik yang berada di sekitar Gunung berapi. Salah satu Gunung vulkanik yang cukup aktif di Indonesia adalah Gunung Soputan di Minahasa Tenggara, Sulawesi Utara. sehingga sangat memungkinkan untuk dilakukan ekstraksi silika sebagai *raw material* dalam pembuatan Zeolit Y (Munandar, 2014).

Pada penelitian ini dilakukan sintesis Zeolit Y secara hidrotermal. Zeolit Y memiliki cukup banyak aplikasi yang dapat diterapkan. Diantaranya Zeolit Y dapat digunakan sebagai katalis dalam perengkahan minyak bumi, selain itu Zeolit Y digunakan untuk memindahkan sulfur dioksida ( $\text{SO}_2$ ) dari suatu gas sisa dengan cara absorpsi (Darmono, 2001).

Penelitian akan berfokus pada tiga aspek utama yaitu ekstraksi silika yang berasal dari pasir vulkanik Gunung Soputan, sintesis Zeolit Y secara hidrotermal, dan adsorpsi logam berat Pb yang merupakan logam pencemar lingkungan yang berbahaya bagi kesehatan dan lingkungan.

## BAHAN DAN METODE

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, pasir vulkanik Gunung Soputan di Minahasa Tenggara. Bahan-bahan kimia dari MERCK HCl 37%, NaOH,  $\text{AgNO}_3$  10%,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan Akuades.

### Preparasi Pasir Vulkanik Gunung Soputan

Pasir vulkanik direndam dengan menggunakan akuades selama 1 jam. Setelah itu disaring dengan kertas saring sampai didapatkan endapan pasir. Filtrat dibuang antara lain: dengan cara didekantasi, pasir vulkanik dikeringkan pada suhu ruang selama 24 jam untuk penghilangan kadar airnya. Setelah kering kemudian pasir vulkanik digerus dengan menggunakan mortar untuk proses ekstraksi silika (Wijaya dkk., 2012).

### Ekstraksi $\text{SiO}_2$ dari Pasir Vulkanik Gunung Soputan

Pasir vulkanik yang sudah dikeringkan dan digerus kemudian ditimbang sebanyak 500 g, lalu dicuci menggunakan metode refluks HCl 6 M pada suhu  $90^\circ\text{C}$  selama 3 jam, kemudian disaring dan diambil endapannya. Dicuci endapan dengan akuades sampai netral, lalu direaksikan dengan NaOH 6 M dan diaduk menggunakan pengaduk magnetik selama 16 jam pada suhu  $90^\circ\text{C}$  untuk mendapatkan larutan filtrat. Endapan dipisahkan melalui penyaringan. Filtrat dipanaskan dengan suhu  $40^\circ\text{C}$  selama 10 menit kemudian dititrasi dengan HCl 4 M sambil diputar menggunakan magnetik stirrer pada suhu  $40^\circ\text{C}$  hingga pH mendekati 8 dan terbentuk endapan putih silika. Endapan silika yang dihasilkan kemudian disaring menggunakan kertas saring dan dicuci menggunakan akuades untuk menghilangkan pengotor yang berupa garam NaCl dari endapan  $\text{SiO}_2$ . Endapan lalu dikeringkan pada suhu  $80^\circ\text{C}$  selama 24 jam. Untuk memastikan bahwa  $\text{SiO}_2$  telah bebas dari garam NaCl maka dilakukan pengecekan menggunakan  $\text{AgNO}_3$  10%. Hasil ekstraksi dianalisis dengan (*X-ray Fluorescence*) XRF (Wijaya dkk., 2012).

### Sintesis Zeolit Y

Sintesis Zeolit Y dilakukan sesuai komposisi molarnya sebagai berikut:  $10 \text{ Na}_2\text{O} : 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 : 15 \text{ SiO}_2 : 300 \text{ H}_2\text{O}$ . Campuran awal yang dibuat dengan mencampurkan 2,8 g  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 4,13 g ekstrak  $\text{SiO}_2$ , 3,63 g NaOH, dan 23,12 g  $\text{H}_2\text{O}$  dan diaduk selama 30 menit. Kemudian dipindah ke dalam botol polipropilena dan dieramkan selama 24 jam. Kristalisasi dilakukan dengan metode hidrotermal pada suhu  $80^\circ\text{C}$  selama 48 jam. Kristal yang terbentuk dicuci dengan akuades sampai pH = 7 - 8, kemudian dikeringkan pada suhu  $100^\circ\text{C}$  selama 12 jam. Hasil sintesis dianalisis dengan XRD (*X-Ray Diffraction*) dan SEM (*Scanning Electron Microscope*) (Sang dkk., 2005).

### Pengujian Kapasitas Adsorpsi Zeolit Y Terhadap Logam Berat Pb

Larutan Pb 20 ppm dibuat dari  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ , kemudian dilakukan pengujian dengan memasukkan 0,5 g Zeolit Y yang dihasilkan ke dalam 50 mL larutan Pb 20 ppm, diaduk dengan pengaduk magnet selama variasi waktu 40, 50, dan 60 menit. Selanjutnya dilakukan dekantasi terhadap larutan dan filtratnya dianalisis dengan (*Atomic Absorption Spectrophotometry*) AAS (Kristiyani dkk., 2012).

### Pengujian Lifetime Zeolit Y

Zeolit Y hasil adsorpsi pada variasi waktu yang paling optimum digunakan kembali pada percobaan sampai 3 kali percobaan dengan pencucian menggunakan HCl 3 M pada setiap siklus

adsorpsi larutan Pb 20 ppm. Digunakan persamaan garis lurus  $y = ax + b$  sebagai acuan perhitungan *lifetime* Zeolit Y (Wijaya dkk., 2012).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Ekstraksi SiO<sub>2</sub> dari Pasir Vulkanik Gunung Soputan

Hasil ekstraksi silika (SiO<sub>2</sub>) dari pasir vulkanik Gunung Soputan yang telah dilakukan refluks bertahap dengan HCl dan NaOH, dianalisis menggunakan instrumen XRF (*Hitachi High-Tech Lab-X500*) didapatkan kadar kemurnian SiO<sub>2</sub> sebesar 92,37 %

Tabel 1. Kandungan Oksida Logam Hasil Ekstraksi Pasir Vulkanik Gunung Soputan

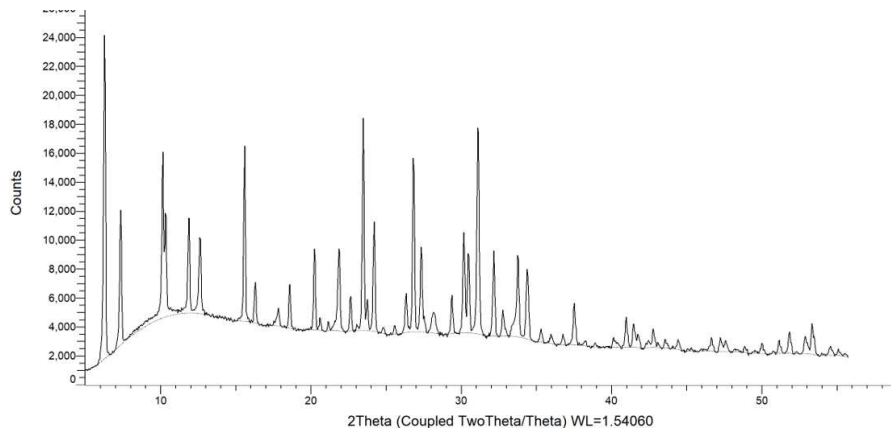
Logam	Kandungan %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,18
CaO	0,04
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
MgO	0,57
MnO	-
Ni	-
SiO <sub>2</sub>	92,37
TiO <sub>2</sub>	0,05
Zn	0,05
Co	0,16
Lainnya	2,54

Hasil XRF menunjukkan bahwa sampel hasil ekstraksi memiliki kandungan silika (SiO<sub>2</sub>) sangat tinggi, yaitu 92,37%, yang menandakan bahwa proses pemurnian silika dari pasir vulkanik Gunung Soputan berjalan dengan sangat baik. Pasir vulkanik pada umumnya mengandung silika bersama mineral-mineral lain seperti alumina, besi, kalsium, magnesium, dan sejumlah unsur transisi. Tingginya kandungan SiO<sub>2</sub> dalam sampel ini menunjukkan bahwa sebagian besar pengotor mineral telah berhasil dihilangkan selama proses ekstraksi baik melalui pelindian asam dan pencucian dengan akuades (Wijaya dkk., 2012). Komposisi silika yang mendominasi ini mencerminkan karakter pasir vulkanik Gunung Soputan yang memang kaya akan mineral kuarsa dan silikat, sehingga sangat potensial sebagai sumber bahan baku silika.

Kandungan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sebesar 4,18% menunjukkan bahwa sebagian kecil mineral aluminosilikat masih tersisa dalam sampel, yang wajar karena aluminium umumnya sangat sulit dihilangkan sepenuhnya dari struktur silikat alam. Dominasi SiO<sub>2</sub> dan rendahnya Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mengindikasikan bahwa sampel memiliki rasio Si/Al yang tinggi, sehingga sifatnya lebih mendekati silika murni (SiO<sub>2</sub>) dibandingkan material aluminosilikat. Sebaliknya, oksida-oksida logam lain seperti MgO (0,57%), TiO<sub>2</sub> (0,05%), CaO (0,04%), serta jejak Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Zn berada pada konsentrasi yang sangat rendah.

### Sintesis Hidrotermal Zeolit Y

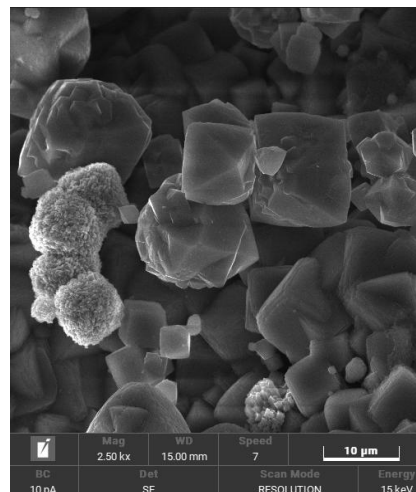
Pola XRD pada gambar 1. menunjukkan karakteristik khas Zeolit Y yang termasuk dalam keluarga faujasit. Zeolit Y umumnya memiliki pola difraksi dengan puncak-puncak intensitas tinggi pada rentang sudut  $2\theta$  yang rendah, khususnya antara  $2\theta = 5-35^\circ$ , karena struktur kerangka aluminosilikatnya yang teratur serta ukuran pori yang besar. Pada pola XRD ini terlihat deretan puncak yang sangat tajam, sempit, dan terpisah jelas, yang menandakan bahwa sampel Zeolit memiliki kristalinitas yang tinggi serta tingkat keteraturan struktur yang baik. Puncak-puncak utama yang muncul pada sekitar  $2\theta = 6^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 23^\circ, \text{ dan } 27^\circ$ , sesuai dengan puncak-puncak karakteristik Zeolit tipe faujasit (Wijaya dkk., 2023). Puncak intens pada sekitar  $2\theta = 6^\circ$  merupakan ciri khas refleksi bidang [111] faujasit, dan puncak-puncak lainnya yang konsisten dengan struktur faujasit.



Gambar 1. Spektra XRD Zeolit Y

Terlihat sedikit peningkatan intensitas pada *baseline* di rentang sekitar  $2\theta = 5-10^\circ$ . Peningkatan *baseline* ini biasanya disebabkan oleh sebagian kecil material amorf, kelembapan yang terserap di dalam pori-pori Zeolit, atau adanya aluminosilikat yang belum sepenuhnya terkristalisasi (Bani, 2023). Meskipun demikian, kontribusi amorf tersebut sangat kecil dan tidak memengaruhi kristalinitas.

Pada Gambar 2. terlihat citra SEM Zeolit Y adalah senyawa aluminosilikat dengan struktur kristalin yang memiliki kerangka tiga dimensi yang terdiri dari unit-unit tetrahedral  $\text{SiO}_4$  dan  $\text{AlO}_4$ , dihubungkan oleh oksigen (Wijaya dkk., 2023). Zeolit Y adalah salah satu jenis Zeolit yang terkenal karena sifat porositas dan kemampuannya dalam proses adsorpsi. Terlihat bahwa Zeolit Y yang dihasilkan memiliki struktur permukaan yang khas dikarenakan proses pembuatan atau sintesis Zeolit Y mempengaruhi ukuran kristal dan bentuknya. Morfologi material Zeolit memiliki dampak langsung pada performa Zeolit dalam aplikasi adsorpsi. Citra SEM menunjukkan gambaran permukaan Zeolit Y pada pembesaran 2500x dengan ukuran kristal 1-10  $\mu\text{m}$ . Pada citra ini, terlihat struktur kristalin Zeolit Y yang berbentuk oktahedral yang saling terhubung satu sama lain membentuk aglomerat, atau kelompok partikel yang lebih besar. Permukaan kristal Zeolit Y terlihat kasar, dengan banyak tekstur halus, yang menandakan adanya lapisan mikro yang lebih kecil di sepanjang permukaan kristal tersebut.

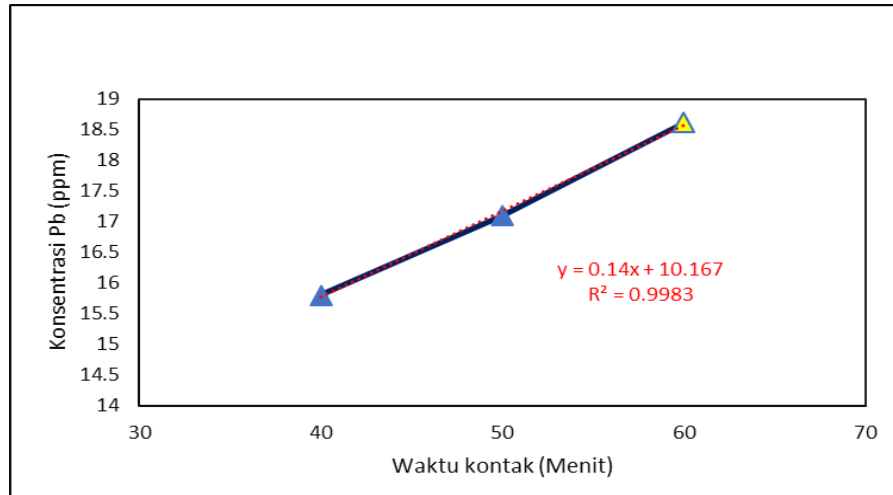


Gambar 2. Citra SEM Zeolit Y

### Efisiensi Adsorpsi Zeolit Y Terhadap Logam Berat Pb

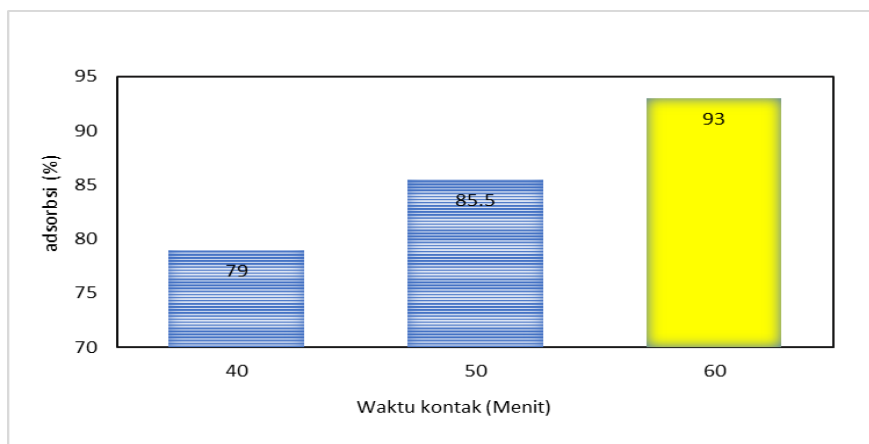
Perbedaan kapasitas adsorpsi antara variasi waktu kontak 40, 50, dan 60 menit dengan jumlah logam berat Pb yang teradsorpsi oleh Zeolit Y selama proses adsorpsi terlihat pada Gambar 3 dan 4.

Persen adsorpsi logam berat Pb yang dihasilkan dari 3 waktu kontak berturut-turut yaitu 79, 85,5, dan 93%. Identifikasi Pb dilakukan menggunakan instrumen AAS dengan cara mengukur sisa konsentrasi Pb dalam larutan setelah adsorpsi pada masing-masing waktu kontak



Gambar 3. Grafik Waktu Kontak Vs Konsentrasi Logam Pb Teradsorpsi

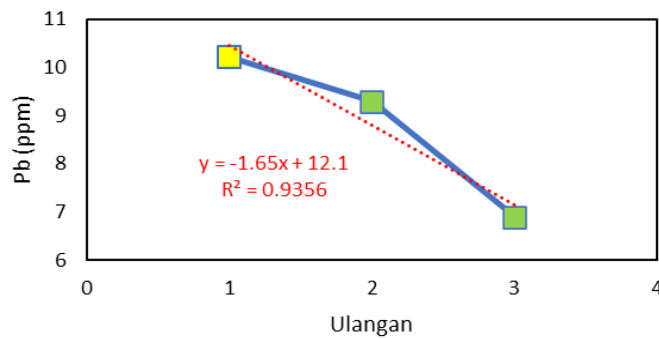
Gambar 3. menunjukkan kecenderungan linier yang kuat antara waktu kontak dan perubahan konsentrasi Pb, dengan persamaan  $y = 0,14x + 10,167$  serta nilai  $R^2 = 0,998$ , menandakan bahwa variasi waktu kontak memiliki pengaruh signifikan terhadap jumlah Pb yang terukur pada akhir proses. Secara teoritis, proses adsorpsi logam oleh Zeolit Y dipengaruhi oleh beberapa mekanisme, termasuk pertukaran ion  $Pb^{2+}$  dengan kation dalam struktur Zeolit, interaksi elektrostatik antara muatan negatif kerangka aluminosilikat Zeolit dan ion  $Pb^{2+}$ , serta difusi ion ke dalam pori-pori Zeolit (Wijaya dkk., 2025). Dengan bertambahnya waktu kontak, biasanya semakin banyak ion Pb yang memiliki kesempatan untuk berdifusi ke dalam pori dan berinteraksi dengan situs aktif Zeolit. Dengan demikian, variasi waktu kontak menjadi faktor penting dalam menentukan efisiensi adsorpsi dan dapat menentukan waktu optimum yang menghasilkan penyerapan maksimum oleh Zeolit Y.



Gambar 4. Pengaruh Waktu Kontak Pada Persen Adsorpsi Zeolit Y

### Pengujian *LifeTime* Zeolit Y

Pengujian *lifetime* untuk Zeolit Y dilakukan dengan cara pengujian kembali Zeolite Y pada proses adsorpsi logam berat Pb 20 ppm sebanyak tiga kali pengulangan. Zeolit Y yang digunakan adalah Zeolite Y yang memiliki nilai persen adsorpsi terbaik dari tiga waktu kontak yang ada, waktu kontak 60 menit adalah waktu kontak terbaik yang digunakan.



Gambar 5. Grafik *Lifetime* Penggunaan Kembali Zeolit Y

Perubahan kemampuan Zeolit Y dalam mengadsorpsi logam berat Pb selama tiga kali pemakaian ulang setelah setiap siklus dilakukan proses pencucian menggunakan larutan HCl. Pada ulangan pertama, konsentrasi Pb yang teradsorpsi berada pada nilai tertinggi 51%, menandakan bahwa situs aktif pada Zeolit Y masih dalam kondisi optimal untuk menangkap ion  $Pb^{2+}$ . Namun, seiring bertambahnya jumlah ulangan, terlihat adanya penurunan konsentrasi Pb yang teradsorpsi menjadi 46,5%. Hal ini mengindikasikan bahwa kemampuan adsorpsi Zeolit menurun pada siklus kedua dan menjadi lebih rendah lagi pada siklus ketiga sebesar 34,5%. Penurunan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Meskipun telah dicuci dengan HCl, proses regenerasi tersebut tidak sepenuhnya mengembalikan struktur dan kapasitas situs aktif Zeolit seperti kondisi awal. Sebagian ion Pb kemungkinan masih tertahan kuat di dalam pori atau pada permukaan Zeolit, sehingga mengurangi jumlah situs aktif yang tersedia untuk adsorpsi berikutnya (Wardalia, 2016). Selain itu, pencucian berulang dengan HCl dapat menyebabkan perubahan struktur sebagian pori atau mengakibatkan kerusakan minor pada kerangka Zeolit, sehingga menurunkan luas permukaan efektifnya (Wijaya dkk., 2023).

Persamaan regresi linier pada grafik ( $y = -1.65x + 12.1$ ) menunjukkan pola penurunan kemampuan adsorpsi secara konsisten dari ulangan pertama hingga ketiga (Atkins, 1999). Nilai  $R^2 = 0.9356$  menandakan bahwa model linier ini sangat baik dalam menggambarkan hubungan antara jumlah siklus dan penurunan kapasitas adsorpsi. Berdasarkan model regresi tersebut, Zeolit Y diperkirakan dapat digunakan sekitar tujuh kali sebelum kapasitas adsorpsinya mendekati 0 ppm. Zeolit Y masih bisa digunakan beberapa siklus lagi tetapi dengan kemampuan adsorpsi yang semakin kecil dan pada titik sekitar ulangan ke-7 Zeolit tersebut tidak efektif lagi.

## KESIMPULAN

Kandungan mineral silika yang didapatkan dari hasil ekstraksi pasir vulkanik Gunung Soputan memiliki kemurnian 92,37%. Zeolit Y berhasil disintesis menggunakan metode hidrotermal dan telah terkarakterisasi menggunakan XRD dan SEM, ditunjukkan munculnya puncak-puncak pada XRD yang merupakan ciri khas Zeolit Y pada sudut  $2\theta = 6^\circ$  [111]. Hasil citra SEM menunjukkan bentuk kristal oktahedral sebagai ciri khas Zeolite Y yang telah terbentuk dan memiliki sebaran yang baik. Kapasitas adsorpsi Zeolit Y telah diuji menggunakan proses adsorpsi logam berat Pb pada variasi waktu kontak 40, 50, dan 60 menit dan memiliki persen adsorpsi tertinggi pada waktu kontak 60 menit sebesar 93%. Pengujian *lifetime* menunjukkan Zeolit Y dapat digunakan sebanyak 7 kali pemakaian jika merujuk pada persamaan garis  $y = -1,65x + 12,1$  dengan nilai  $R^2 = 0,9356$ .

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Universitas Sam Ratulangi melalui Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat yang membiayai penelitian ini melalui DIPA UNSRAT Tahun

2025 No. SP DIPA-139.03.2.693382/2025 dalam skema Riset Dasar Terdepan Umum Unggulan Unsrat (RDTU3).

## DAFTAR PUSTAKA

- Atkins, P. 1999. *Physical Chemistry (6th ed.)*: Oxford: Oxford University Press.
- Bani, G. A. 2023. Efektivitas Katalis Zeolit Alam Ende pada Pirolisis Polietilena dari Sampah Plastik. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 12(2), 70-77
- Darmono, S. 2001. *Kimia Lingkungan dan Dampak Logam Berat*. Jakarta: UI-Press.
- Hwang, S. J., Lee, S. H., & Kim, J. 2000. Structural characterization of Zeolite frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 122(40), 9804-9813
- Kristiyani, D., Susatyo, E. B., & Prasetya, A. T. 2012 Pemanfaatan Zeolit Abu Sekam Padi Untuk Menurunkan Kadar Ion Pb<sup>2+</sup> Pada Air Sumur. *Indonesian Journal of Chemical Science*, 1 (1), 2252-6951
- Munandar, A. 2014. *Pencemaran Logam Berat di Lingkungan dan Dampaknya Terhadap Kesehatan Manusia*. Padang: Universitas Andalas
- Palar, H. 2004. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Jakarta: Rineka Cipta.
- Sang, S., Liu, Z., Tian, P., Liu, Z., Qu, L., & Zhang, Y. 2005. Synthesis of Small Crystals Zeolite NaY. *Materials Letters*, 60, 1131-1133.
- Tinaiy. A. M., Rogi, O.H., & Siregar, F.O.P. 2020. Pemetaan Kerentanan Terhadap Bahaya Bencana Vulkanik Gunung Soputan Kabupaten Minahasa. *Jurnal Perencanaan Wilayah dan Kota*, 7(1), 2422-3662.
- Tombeg, C.V., Manoppo, M. R. E., & Sendow, T.K. 2019. Pemanfaatan Sedimen Transport Abu Vulkanik (Gunung Soputan ) Sebagai Bahan Substitusi Pada Abu Dalam Campuran Aspal HRS-WC Gradasi Semi. *Jurnal Sipil Statik*, 7(3), 309-318.
- Wardalia. 2016. Karakterisasi Pembuatan Adsorben dari Sekam Padi Sebagai Pengadsopsi Logam Timbal (Pb) pada Limbah Cair, *Integrasi Proses*, 6 (2), 83-88.
- Wijaya, D.P., Rohman, M., & Putri, R.P. 2023. Sintesis dan Karakterisasi Zeolit Y dengan Metode Hidrotermal. *Jurnal MIPA dan Pembelajarannya*, 3 (7), 303-3020.
- Wijaya, D.P., Trisunaryanti, W., Triyono, Dewi, K., & Marsuki, M.F. 2018. Synthesis and Characterization of K<sub>2</sub>O/MCM-41 (Mobil Composition of Matter No. 41) from Lapindo Mud by Sonochemical Method for Transesterification Catalyst of Used Cooking Oil. *Oriental Journal of Chemistry*, 34, 1847-1853.
- Wijaya, D.P., Bonaventura, R., Munandar, N., Hutagalung, F., & Anwar, C. 2025. Adsorption-Desorption of Cd(II) and Mg(II) Ions by Dithizone Immobilized Coal Bottom Ash. *Indonesian Journal Chemistry Study*, 4(2), 92-100.