



Remediasi Tanah Tercemar Pb di Lokasi Pertambangan Emas Selogiri, Wonogiri dengan Menggunakan Tuf Zeolitik

Lia Nazmi Aida*¹, Wawan Budianta²

^{1,2}Departemen Teknik Geologi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta

*lia.nazmi.aida2015@gmail.com

Abstract

Soil contamination was commonly found in gold mining location in Selogiri, Wonogiri, and Central Java and need serious attention for remediation action. This study aimed to investigate the mineralogical characteristic of zeolitic tuff and to analyze the influence of its characteristic for lead sorption on soil in mining, as mentioned earlier location. The soil sample was obtained from around the gold mining location. The zeolitic tuff was obtained in two locations in Gunungkidul, Yogyakarta: A and B. Zeolitic tuff samples were then characterized for mineralogy content using polarization microscopes, cation exchange capacity (CEC) by using barium chloride method and XRD (X-Ray Diffraction) analysis. A batch test was conducted on a laboratory scale by shaking zeolitic tuff samples with soil samples in a CaCl₂ solution. The solution was then shaken using a magnetic stirrer, and the filtrate was sampled at a specific time interval. The batch test result showed that the zeolite mineral percentage influenced the sorption behavior of zeolitic tuff in the sample and the value of CEC, which the more zeolite mineral and CEC value, the higher of sorption capacity achieved up to 58.8%. Hence, zeolitic tuff investigated in this study has a promising material for the remediation of Pb-contaminated soil in Selogiri, Wonogiri, and Central Java.

Keywords: Remediation, Soil, Lead, Zeolitic tuff.

Abstrak

Lokasi pertambangan emas di Selogiri, Wonogiri, Jawa Tengah, diketahui telah terjadi pencemaran tanah oleh timbal dan perlu mendapatkan perhatian untuk dilakukan remediasi. Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi karakteristik mineralogi tuf zeolitik dan pengaruhnya terhadap efektivitas penyerapan Pb dalam tanah di lokasi pertambangan yang dimaksud. Sampel tanah diambil dari lokasi tambang emas dan sampel tuf zeolitik diambil di Gunungkidul, Yogyakarta, dinamakan sampel A dan sampel B. Kemudian dilakukan analisis mineralogi pada sampel tuf zeolitik yang meliputi analisis petrografi dengan menggunakan mikroskop polarisasi, analisis KPK dengan metode Barium Klorida, dan analisis XRD (*X-Ray Diffraction*). Uji batch di laboratorium dilakukan dengan cara mencampur sampel tuf zeolitik yang dihaluskan (<0.15 mm) dengan sampel tanah tercemar Pb sebanyak 100 gram dan dilarutkan dengan menggunakan CaCl₂. Kemudian, dilakukan pengadukan dengan menggunakan pengaduk magnetik dan filtrat yang diambil pada interval waktu tertentu. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses penyerapan zeolit yang dilakukan pada percobaan batch di laboratorium dipengaruhi baik oleh persentase mineral zeolit yang hadir maupun nilai KPK yang dimiliki oleh zeolit sampel. Hasil uji batch menunjukkan bahwa semakin banyak persentase zeolit dan nilai KPK maka efektivitas penyerapan lebih tinggi dan mencapai optimum yang dapat dicapai sebesar 58,8%.

Kata Kunci: Remediasi, Tanah, Pb, Tuf zeolitik.

1. PENDAHULUAN

Pertambangan emas skala kecil atau pertambangan emas rakyat seringkali menyebabkan dampak pencemaran pada lingkungan (Aspinall, 2001). Penambangan tersebut dapat mengakibatkan adanya pencemaran logam berat seperti arsen (As), kadmium (Cd), merkuri (Hg) dan timbal (Pb) pada tanah. Widhiyatna dkk (2006) meneliti kandungan logam berat Pb di daerah

Selogiri pada tailing mencapai 416–2945 mg/kg dan pada batuan sebesar 61–3931 mg/kg, dimana sudah melebihi ambang batas standar kandungan Pb di lingkungan. Kemudian, Htun dkk (2006) juga meneliti kandungan Pb sebesar 2890 mg/kg pada host-rock dan 20–10000 mg/kg pada tailing. Tuf zeolitik banyak ditemukan di Indonesia dan beragam jenisnya. Heterogenitas dari tuf

zeolitik tersebut dipengaruhi oleh karakteristik fisik (meliputi warna, ukuran butir, dan tingkat kekompakan batuan), karakteristik mineralogi berupa komposisi mineral, kimia, dan keberadaan mineral pengotor (seperti kuarsa, feldspar, mika, dan mineral – mineral hasil ubahan tuf zeolitik) serta nilai KPK. Adanya perbedaan karakteristik tersebut juga mempengaruhi kemampuan penjerapan tuf zeolitik (Machiels dkk, 2008; Velarde dkk, 2023; Mubarak dkk, 2022). Berdasarkan hal tersebut, maka penelitian ini penting untuk dilakukan untuk menginvestigasi lebih lanjut pemanfaatan tuf zeolitik dalam mengatasi masalah pencemaran Pb pada tanah di daerah lokasi yang dimaksud. Selanjutnya, karakterisasi tuf zeolitik penting dilakukan untuk mengetahui sampel tuf zeolitik yang berpotensi memiliki nilai kapasitas penjerapan yang tinggi sehingga persentase efektivitas penjerapannya akan besar. Tuf zeolitik diambil di Kabupaten Gunungkidul karena berdasarkan penelitian sebelumnya (Ardiana dkk, 2019) daerah tersebut memiliki kelimpahan tuf zeolitik yang cukup baik sehingga dapat menyerap hingga 50% konsentrasi larutan Pb, namun belum banyak dimanfaatkan sebagai material remediasi tanah tercemar Pb. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik mineralogi tuf zeolitik dan menganalisis pengaruh karakteristik mineraloginya terhadap efektivitas penjerapan Pb dalam tanah di lokasi pertambangan di Wonogiri, Jawa Tengah.

2. METODE PENELITIAN

Sebanyak 5 kilogram tanah diambil dari lokasi tambang emas tradisional di Selogiri, Wonogiri yang berdekatan dengan lokasi bekas pengolahan tambang dan bekas pembuangan limbah tambang (*tailing*), dan diharapkan tanah memiliki kandungan Pb yang cukup tinggi. Sampel tuf zeolitik sebanyak 1 kilogram diambil di Gunungkidul, Yogyakarta, pada dua lokasi yang berbeda, dinamakan sampel A dan sampel B. Kemudian dilakukan analisis mineralogi pada sampel tuf zeolitik yang meliputi analisis petrografi dengan menggunakan mikroskop polarisasi, analisis KPK dengan metode Barium Klorida (Hendershot dan Duquette, 1986) dan analisis XRD (X-Ray Diffraction) (Ali dkk, 2022). Prosedur uji batch di laboratorium dilakukan merujuk pada penelitian lain (Zou dkk, 2006). Sampel tuf zeolitik dihaluskan dan diayak

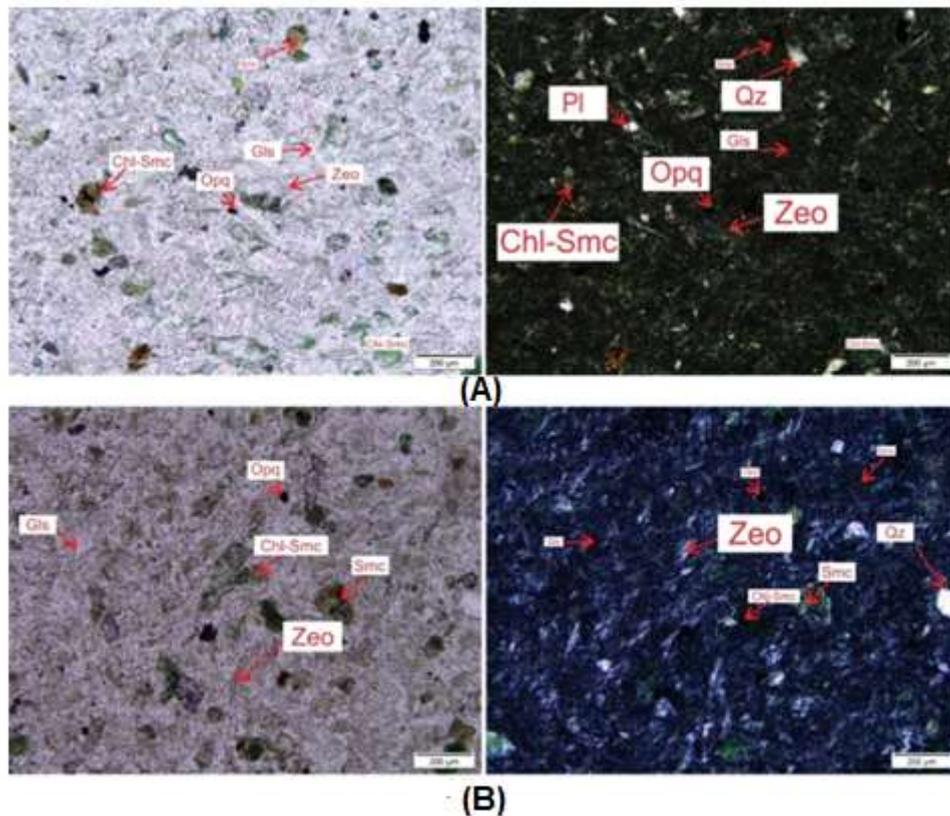
dengan menggunakan mesin pengayak dengan mesh nomor 100 (<0.15 mm). Pada awal uji batch, sampel tanah diuji tanpa penambahan tuf zeolitik. Sampel tanah sebanyak 100 gram dilarutkan dengan menggunakan 100 ml CaCl₂ di dalam gelas beker. Kemudian, dilakukan pengadukan dengan menggunakan pengaduk magnetik dengan kecepatan 200 rpm selama 240 menit dalam suhu 25°C. Filtrat yang diambil pada percobaan ini dinamakan sebagai sampel kontrol. Untuk pengujian batch selanjutnya, dilakukan penambahan tuf zeolitik A dan B ke dalam sampel larutan tanah dan dilakukan percobaan yang sama dengan sebelumnya, dimana ditambahkan 15 gram tuf zeolitik. Filtrat kemudian diambil sebanyak 5 ml pada menit ke 15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, dan 1440. Analisis konsentrasi Pb pada filtrat dilakukan dengan menggunakan ICP AES (Moor dkk, 2022).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

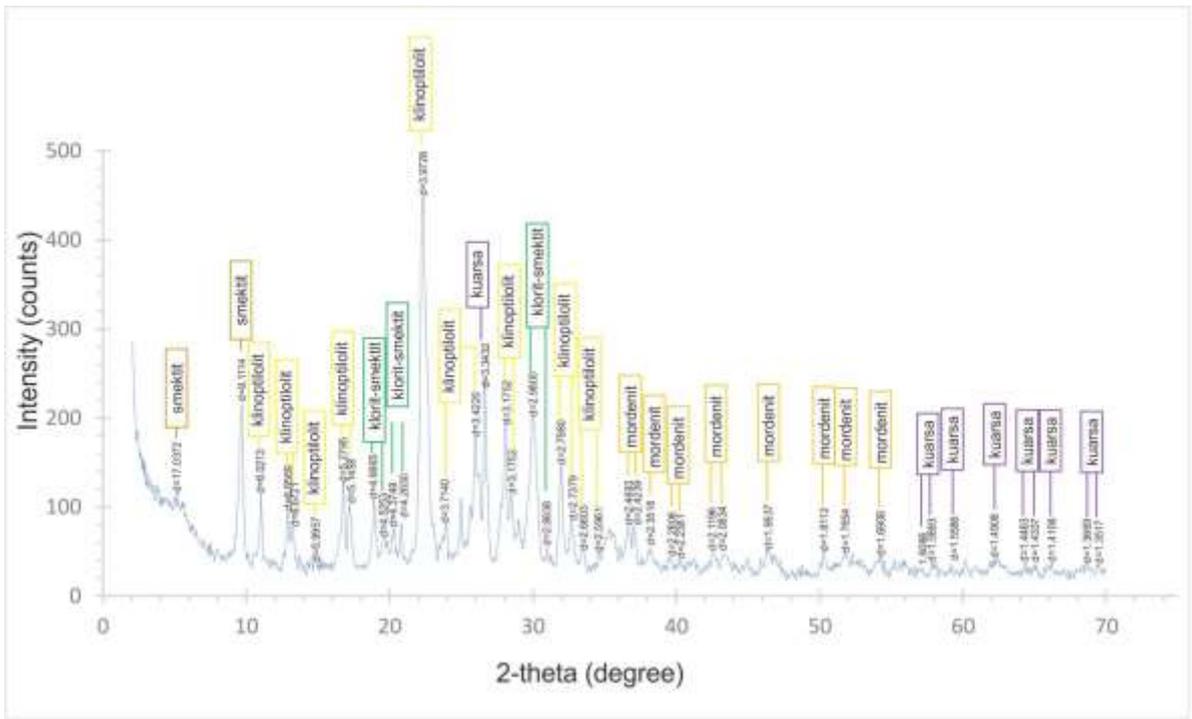
Sampel tuf zeolitik yang diambil dari lokasi berupa batuan piroklastik masih segar dan memiliki ukuran butir halus serta diperkirakan mengandung mineral zeolit yang cukup banyak, dilihat dari kenampakan makroskopis batuan. Kenampakan dari tuf zeolitik sendiri berupa batuan piroklastik terdiagenesis sehingga cukup berat, dengan warna dominan abu – abu kehijau – hijauan atau abu – abu cerah kecoklat – coklatan, akan lengket apabila diberi air. Secara mikroskopis, tuf zeolitik memiliki kenampakan tidak berwarna pada nikol sejajar dan abu – abu pada kenampakan nikol bersilang (Gambar 1). Ukuran mineral zeolit <0,01 mm hingga 0,1 mm, dengan relief rendah. Mineral zeolit hadir bersamaan dengan gelas dan merupakan mineral ubahan dari gelas vulkanik. Relief mineral zeolit rendah dan memiliki struktur kipas meruncing dan tabular, tergantung pada jenis mineral zeolit yang ditemukan. Secara keseluruhan, kenampakan tuf zeolitik berwarna putih kehijau – hijauan pada nikol sejajar (PPL) dan abu – abu kehitaman – hitaman pada nikol bersilang (XPL). Kondisi batuan mulai dari segar hingga agak lapuk yang ditandai dengan kehadiran mineral smektit dan oksida Fe. Tekstur batuan klastik, berukuran butir <0,01 mm – 0,25 mm, sortasi baik hingga sedang, kemas tertutup, bentuk butir subrounded – subangular, tipe porositas interpartikel, dengan komposisi tersusun oleh gelas vulkanik, klorit, mineral lempung, zeolit, dan mineral opak. Sampel tuf zeolitik memiliki

warna putih kecoklat-coklatan, berukuran ukuran butir lanau hingga pasir sedang, struktur masif, tingkat kebundaran subrounded, sortasi sedang, kemas tertutup. Komposisi mineral primer pada batuan berupa material sedimen berukuran pasir halus – sedang, gelas vulkanik, plagioklas dan kuarsa. Mineral sekunder pada batuan ini berupa zeolit, oksida besi dan mineral lempung. Sampel tuf zeolitik memiliki persentase kandungan yang bervariasi, dimana mineral zeolit dengan rentang 15 – 40% berdasarkan pengamatan petrografi (Aida, 2020).

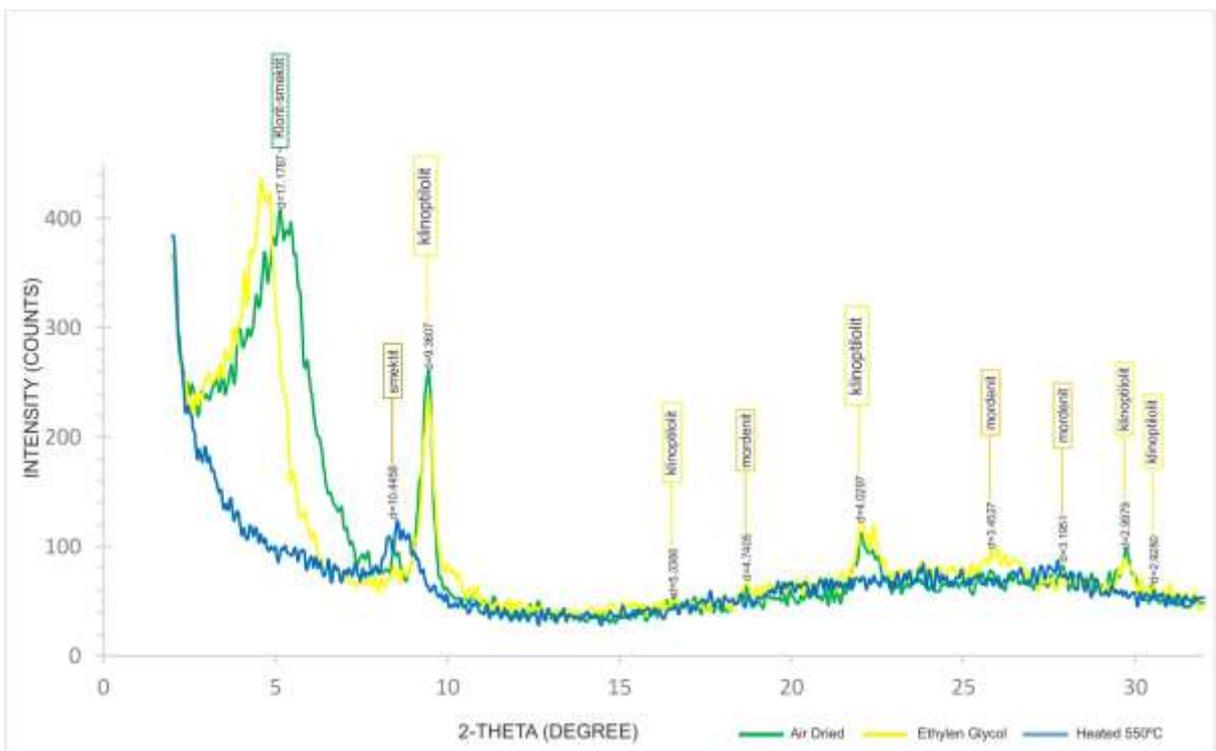
Analisis XRD yang dilakukan meliputi analisis *bulk powder*, *air dried*, *ethylen glycol*, dan *heated 550°C*. Hasil analisis XRD sampel A dan B ditunjukkan pada difraktogram yang dapat dilihat pada Gambar 2, 3, 4 dan 5, dimana mineral yang dapat diidentifikasi antara lain zeolit, kuarsa, mineral lempung, dan klorit-smektit. Perhitungan semi kuantitatif kandungan mineral pada sampel A dan B serta nilai KPK yang diperoleh dari hasil pengukuran ditunjukkan pada Tabel 1 (Aida, 2020).



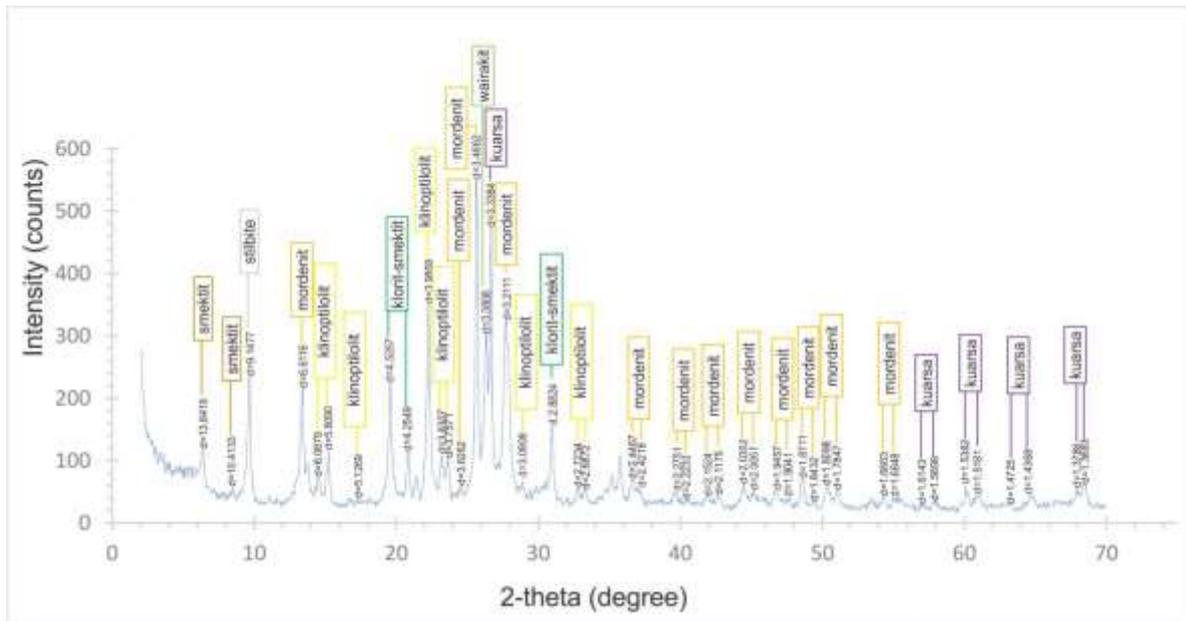
Gambar 1. Kenampakan mikroskopis sampel A dan B dimana mineral zeolit tidak berwarna pada sayatan tipis nikol sejajar (kiri) dan berwarna abu – abu pada nikol bersilang (kanan)
(Sumber: Aida, 2020)



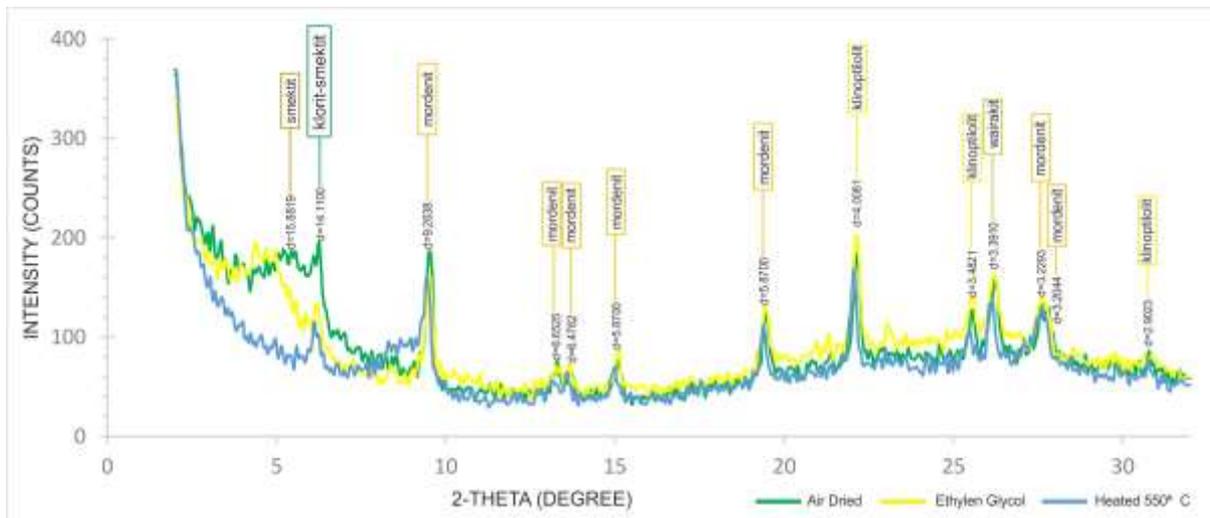
Gambar 2. Difraktogram XRD untuk sampel A (bulk sampel)
(Sumber: Aida, 2020)



Gambar 3. Difraktogram XRD untuk sampel B (ED-EG-Heated 550°C)
(Sumber: Aida, 2020)



Gambar 4. Difraktogram XRD untuk sampel B (bulk sampel)
(Sumber: Aida, 2020)



Gambar 5. Difraktogram XRD untuk sampel B (ED-EG-Heated 550°C)
(Sumber: Aida, 2020)

Tabel 1. Kelimpahan mineral dan nilai KPK pada sampel A dan B

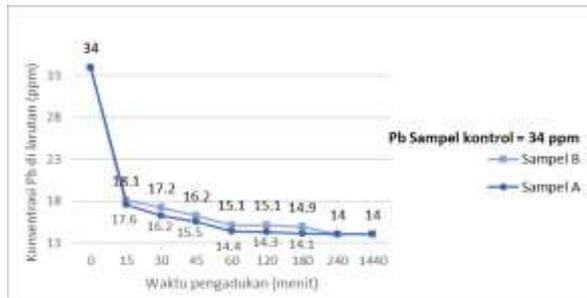
Mineral	Sampel A	Sampel B
Zeolit	52,49 %	39,49 %
Smektit	4,67 %	0,97 %
Klorit-smektit	9,19 %	5,50 %
Total kelimpahan mineral yang mampu menyerap	66,35 %	45,96 %
Kuarsa (pengotor)	6,65 %	9,05 %
KPK (meq/100 gr)	89	79

(Sumber: Aida, 2020)

Uji batch dilakukan dengan menggunakan tuf zeolitik A dan B, masing - masing ditambahkan ke dalam larutan tanah yang mengandung Pb dimana pengambilan filtrat

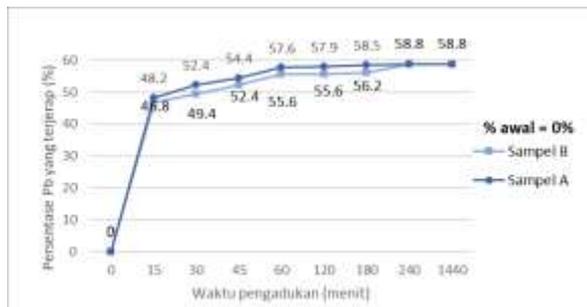
dilakukan pada menit ke 15, 30, 45, 60, 120, 180, 240, dan 1440 menit. Untuk mengetahui konsentrasi awal Pb, dibuat sampel kontrol dimana percobaannya dengan menggunakan

larutan tanah tanpa diberi zeolit dan dilakukan pengadukan selama 4 jam. Data uji batch kemudian disajikan dalam bentuk grafik seperti ditunjukkan pada Gambar 6 (Aida, 2020).



Gambar 6. Efektivitas penjerapan sampel A dan B
(Sumber: Aida, 2020)

Gambar 6 menunjukkan pola kedua grafik menurun dengan sampel A cenderung lebih landai dibandingkan dengan sampel B. Pada grafik sampel A dan B, terjadi penurunan konsentrasi Pb dalam larutan yang cukup signifikan pada menit 15 hingga menit ke 60. Sedangkan, setelah menit ke 60, penurunan terjadi lebih lambat dan mulai konstan pada menit ke 240 hingga 1440 menit. Selanjutnya, data uji batch tersebut disajikan dalam grafik yang menunjukkan persentase penjerapan, dimana terdapat perbedaan persentase penjerapan Pb oleh sampel A dan B seperti terlihat pada Gambar 7 (Aida, 2020).



Gambar 7. Grafik persentase efektivitas penjerapan Pb oleh sampel A dan B
(Sumber: Aida, 2020)

Gambar 7 menunjukkan bahwa terjadi kenaikan konsentrasi Pb yang terjerap oleh tuf zeolitik. Pada sampel A, grafik mulai melandai pada menit ke 60 dimana kenaikan persentase konsentrasi Pb yang terserap oleh tuf zeolitik mulai melambat dan batas jenuh tuf zeolitik dengan larutan tanah yang mengandung Pb terjadi pada menit ke 240 (4 jam), dimana ditunjukkan dengan tidak adanya peningkatan penjerapan Pb oleh tuf zeolitik A. Sedangkan untuk batas jenuh penjerapan Pb dalam

larutan oleh tuf penjerapan oleh sampel B, di menit ke 240 (4 jam), dimana ditunjukkan dengan tidak adanya peningkatan persentase penjerapan Pb oleh tuf zeolitik A pada 1440 menit. Berdasarkan grafik konsentrasi Pb dalam larutan (Gambar 6), dapat diketahui bahwa ada perbedaan nilai dari proses penjerapan pada sampel A dan sampel B. Nilai penjerapan Pb oleh sampel A pada awal percobaan hingga menit ke 180 cenderung lebih besar dibandingkan dengan sampel B, dengan sisa Pb dalam larutan sebesar 17,6 – 14,1 ppm hingga akhirnya pada menit ke 240 sampai 1440 mengalami titik jenuh dan sisa Pb dalam larutan sebesar 14 ppm. Sedangkan pada sampel B, pada menit ke 15 hingga menit ke 180, Pb dalam larutan sebesar 18,1 – 14,9 ppm dan pada menit ke 240 hingga 1440 mengalami titik jenuh dengan konsentrasi Pb sebesar 14 ppm, dimana nilai awal dari konsentrasi Pb yang sama dalam sampel A dan B, yaitu sebesar 34 ppm (didapatkan dari sampel kontrol). Hal tersebut dapat dikarenakan oleh adanya perbedaan persentase mineral zeolit dalam sampel dan adanya kandungan mineral pengotor kuarsa mengurangi nilai KPK sehingga menurunkan kapasitas penjerapan dari tuf zeolitik itu sendiri (Filippidis dkk, 2007; Babak dkk, 2013). Semakin lama waktu pengadukan yang berlangsung, konsentrasi Pb dalam larutan tanah semakin menurun sampai pada menit ke 240 mengalami titik jenuh. Hal tersebut dikarenakan semakin banyaknya pertukaran kation yang terjadi di permukaan tuf zeolitik dengan ion Pb dalam larutan tanah. Dari data XRD, sampel A memiliki komposisi mineral zeolit, smektit, dan klorit-smektit yang lebih besar dibandingkan dengan sampel B (tabel 1). Begitu juga dengan nilai KPK, dimana KPK sampel A sebesar 89 meq/100 gr, sedangkan untuk sampel B sebesar 79 meq/100 gr. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada sampel A terjadi pertukaran kation yang lebih banyak sehingga penurunan konsentrasi Pb dalam larutan lebih besar dibandingkan dengan sampel B (Aida, 2020).

Penurunan konsentrasi Pb dalam larutan tanah berhubungan dengan kemampuan penjerapan tuf zeolitik, dimana kemampuan penjerapan ini dipengaruhi oleh faktor kelimpahan mineral zeolit, smektit, dan klorit-smektit, serta besarnya nilai KPK tuf zeolitik, sehingga semakin tinggi kapasitas penjerapan tuf zeolitik, maka akan semakin besar penurunan konsentrasi Pb dalam larutan

tanah. Secara teoritis, logam yang terjerap akan dipengaruhi oleh perbedaan dalam mekanisme pertukaran ion sesuai dengan proses penjerapan, dimana ion logam bergerak melalui pori – pori mineral zeolit dan kemudian terjadi pertukaran kation (terutama K dan Ca). Ion logam terjerap karena proses pertukaran ion di mikropori mineral zeolit (Budianta dkk, 2020; Popalia dkk, 2022). Dilihat dari kelimpahan mineral zeolitnya, sampel A memiliki persentase mineral zeolit 52,49%, smektit 4,67%, dan klorit- smektit 9,19%. Sedangkan pada sampel B, persentase mineral zeolitnya lebih sedikit yaitu 39,49%, smektit 0,97%, dan klorit-smektit 5,50%. Berdasarkan grafik pada Gambar 7, persentase penjerapan minimum pada sampel tuf zeolitik sebesar 48,2%, dan pada sampel B sebesar 46,8%. Sedangkan untuk persentase kemampuan penjerapan maksimum tuf zeolitik A dan B sama, yaitu sebesar 58,8%. Persentase maksimum dari sampel A dan B sama, dengan karakteristik fisik, mineralogi, dan KPK yang berbeda, tetapi jika dilihat dari data penjerapan Pb, sampel A lebih banyak persentasenya dibandingkan dengan sampel B. Sampel A pada awal percobaan dapat menyerap Pb hingga 48,2%. Sedangkan pada awal percobaan, sampel B menyerap Pb sebesar 46,8%. Dari grafik pada Gambar 7, dapat dilihat bahwa persentase penjerapan oleh sampel A di menit ke 15 hingga 180 lebih besar dibandingkan dengan sampel B hingga akhirnya pada menit ke 240 hingga 1440, persentasenya sama yaitu sebesar 58,8%. Jika dilihat secara keseluruhan, sampel A lebih banyak menyerap Pb dalam larutan dibandingkan dengan sampel B. Persentase maksimum pada sampel A dan B sama kemungkinan juga dipengaruhi oleh kelimpahan mineral zeolit berjenis wairakit pada sampel B, yang memiliki nilai KPK 460 meq/100 gr dan stilbit dengan nilai KPK 320 meq/100 gr (Budianta dkk, 2020; Ugwu dkk, 2022), lebih tinggi dibandingkan klinoptilolit dan mordenit (220 meq/100 gr), sehingga persentase penjerapan maksimum oleh sampel B sama dengan persentase penjerapan maksimum sampel A.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut

1. Tuf zeolitik untuk sampel A mengandung mineral zeolit berjenis klinoptilolit (40,19%) dan mordenit (12,30%), serta mineral smektit (4,67%) dan klorit-smektit (9,19%). Sedangkan pada sampel B mengandung mineral zeolit berjenis klinoptilolit (10,33%), mordenit (22,36%), wairakit (4,25%), dan stilbit (2,55%), serta mineral smektit (0,97%) dan klorit-smektit (5,50%). Selain itu, tuf zeolitik juga mengandung mineral pengotor yaitu kuarsa, pada sampel A sebanyak 6,65% dan pada sampel B sebanyak 9,05%.
2. Uji batch menunjukkan bahwa nilai KPK dan jenis mineral zeolit akan berpengaruh terhadap penjerapan Pb dalam larutan tanah. Sampel A dengan kandungan mineral zeolit 52,49% dan mineral berkemampuan menyerap yang cukup banyak dengan kandungan kuarsa yang sedikit, dan KPK sebesar 89 meq/100 gr dapat menyerap Pb lebih banyak selama proses uji batch hingga akhirnya persentase efektivitas penjerapan maksimum sebesar 58,8%. Sampel B dengan karakteristik yang hampir sama, mineral zeolit yang lebih sedikit, KPK yang lebih rendah (79 meq/100 gr) memiliki penjerapan Pb maksimum yang sama yaitu 58,8% dikarenakan adanya pengaruh kehadiran mineral zeolit berjenis wairakit dan stilbit yang memiliki nilai KPK lebih tinggi daripada mordenit dan klinoptilolit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Gadjah Mada yang telah memberikan dukungan dana penelitian

5. DAFTAR PUSTAKA

- Aida, LN, (2020), Karakteristik Tuf Zeolitik Daerah Tegalrejo, Gunungkidul Dan Efektivitasnya Terhadap Remediasi Tanah Tercemar Timbal, *Skripsi*, tidak dipublikasikan, Departemen Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada.
- Ali, A., Chiang, Y. W., & Santos, R. M. (2022). X-ray diffraction techniques for mineral characterization: A review for engineers of the fundamentals, applications, and research directions. *Minerals*, 12(2), 205.
- Ardiana A, Budianta W, Warmada IW (2019) Remediasi Cd dengan menggunakan tufa zeolitik Tegalrejo, Gunungkidul, Yogyakarta, *Prodising Seminar Nasional Ilmu Kebumihan*

- 2019, Departemen Teknik Geologi Universitas Gadjah Mada.
- Aspinall, C. (2001) *Small-scale mining in Indonesia*. International Institute for Environment and Development, Mining Minerals and Sustainable Development Report, Jakarta.
- Babak K, Rahim AA, Wahid SA, Balasundram SK, Afyuni M (2013) Sorption and desorption of zinc by clinoptilolite and clinoptilolite-tridymite. *Malaysia Journal Soil Sciences*, 17:69–83.
- Budianta, W., Andriyani, N.D., Ardiana, A., Warmada, I.W., 2020, Adsorption of Lead and Cadmium from Aqueous Solution by Gunungkidul Zeolitic Tuff, Indonesia, *Journal Environmental Earth Sciences*, 79:172.
- Filippidis A, Kantiranis N, Stamatakis M, Drakoulis A, Tzamos E (2007) The cation exchange capacity of the Greek zeolitic rocks. *Bulletin Geological Society Greece* 40(2):723–735.
- Hendershot, W. H., dan Duquette, M. (1986). A simple barium chloride method for determining cation exchange capacity and exchangeable cations. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 605-608.
- Htun, T.M., Warmada, I. W., Harijoko, A., Saputra, R., (2006), Arsenic and Heavy Metals Contamination in Small Scale Mining, Selogiri Area, Wonogiri Regency, Central Java, Indonesia: Yogyakarta, *Proceedings of 9th International Symposium on Mineral Exploration*, ITB Bandung (h.69 – 75).
- Machiels, L., Morante, F., Snelling, R., Calvo, B., Canoira, L., Paredes, C., Elsen, J. (2008), Zeolite mineralogy of the Cayo formation in Guayaquil, Ecuador. *Journal Applied Clay Science*, 42: 180-188.
- Moor, C., Lymberopoulou, T., & Dietrich, V. J. (2001). Determination of heavy metals in soils, sediments and geological materials by ICP-AES and ICP-MS. *Microchimica Acta*, 136, 123-128.
- Mubarak, M. F., Mohamed, A. M. G., Keshawy, M., Abd elMoghny, T., & Shehata, N. (2022). Adsorption of heavy metals and hardness ions from groundwater onto modified zeolite: Batch and column studies. *Alexandria Engineering Journal*, 61(6), 4189-4207.
- Popaliya, M., & Mishra, A. (2022). Modified zeolite as an adsorbent for dyes, drugs, and heavy metal removal: A review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1-18.
- Ugwu, E. I., Othmani, A., & Nnaji, C. C. (2022). A review on zeolites as cost-effective adsorbents for removal of heavy metals from aqueous environment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(8), 8061-8084.
- Velarde, L., Nabavi, M. S., Escalera, E., Antti, M. L., & Akhtar, F. (2023). Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review. *Chemosphere*, 138508.
- Widhiyatna, D., Hutamadi, R., Ahdiat, A., (2006) *Proc. Pemaparan Hasil-Hasil Kegiatan Lapangan Dan Non Lapangan Tahun 2006*, Pusat Sumberdaya Geologi. Bandung.
- Zou, W., Han, R., Chen, Z., Jinghua, Z., & Shi, J. (2006). Kinetic study of adsorption of Cu (II) and Pb (II) from aqueous solutions using manganese oxide coated zeolite in batch mode. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 279(1-3), 238-246.