

## SOLIDIFIKASI/STABILISASI ION Pb(II) MENGGUNAKAN GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH*

### *SOLIDIFICATION/STABILIZATION OF Pb(II) IONS USING FLY ASH BASED GEOPOLYMER*

Afran Marcelino Pratama\*, Sesria Safitri

Departemen Kimia, Universitas Negeri Padang, Prof. Dr. Hamka Air Tawar Road, Padang, Indonesia

\*Corresponding author, [afanmarcelinoprata@gmail.com](mailto:afanmarcelinoprata@gmail.com)

#### ABSTRAK

Pb(II) adalah ion logam berat Pb yang berasal dari aktifitas industri. Diantara banyak metode, solidifikasi/stabilisasi (S/S) dinilai tepat untuk mengimobilisasi ion logam toksik tersebut. Penggunaan bahan geopolimer dari fly ash teraktivasi alkali sebagai zat pengikat, berdampak sangat baik dan terbukti efektif terhadap imobilisasi ion logam tersebut. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan 5 konsentrasi ion Pb(II), yaitu 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5% dan 3,0%. Hasil studi ini diperoleh konsentrasi ion Pb(II) optimum yaitu pada 2,0% dengan konsentrasi *leaching out* ion Pb(II) adalah 1,23 dan 1,22 mg.L<sup>-1</sup> untuk waktu pengawetan campuran padat masing-masing 3 dan 7 hari. Sedangkan nilai kuat tekan yang dimiliki adalah berkisar 40 MPa. Analisis menggunakan FTIR didapati stuktur yang padat dan baik dari campuran padatan.

**Kata kunci:** solidifikasi/stabilisasi, logam berat, ion Pb(II), *fly ash*, geopolimer

#### ABSTRACT

*Pb(II) is a heavy metal ion of Pb originating from industrial activities. Among many methods, solidification/stabilization (S/S) is considered appropriate to immobilize these toxic metal ions. The use of geopolimer material from alkaline activated fly ash as a binder has a very good impact and has been proven to be effective against the immobilization of metal ions. The research was conducted by varying the concentration of 5 Pb(II) ions, namely 1.0%; 1.5%; 2.0%; 2.5% and 3.0%. The results of this study obtained that the optimum concentration of Pb(II) ions was at 2.0% with the concentration of leaching out Pb(II) ions of 1.23 and 1.22 mg.L<sup>-1</sup> for a solid mixture curing time of 3 and 7 days. Meanwhile, the compressive strength value is around 40 MPa. Analysis using FTIR found a solid and good structure of the solid mixture.*

**Keywords:** *solidification/stabilization, heavy metals, Pb(II) ions, fly ash, geopolimer*

## 1. PENDAHULUAN

Logam berat merupakan komponen utama dari polutan anorganik yang telah mencemari air secara luas (Gu dkk., 2019). Timbal adalah salahsatu diantara logam berat yang bersifat sangat toksik, tidak dapat terurai, dan dapat terbioakumulasi (Chheang dkk., 2021). Logam timbal merupakan elemen toksik umum ketiga dalam daftar toksisitas logam berat. Bahkan, *World Health Organization* (WHO) menetapkannya ke dalam 10 bahan kimia penyebab masalah kesehatan masyarakat yang signifikan. Paparannya memiliki efek buruk pada fungsi

neurologis, biologis, dan kognitif dalam tubuh (Balali-Mood dkk., 2021). Diketahui bahwa pendistribusiannya ke lingkungan dapat melalui industri baterai timbal, kertas, kaca, dan industri pemolesan (Xia dkk., 2022). Keberadaannya di lingkungan seperti di dalam tanah, air tanah, dan air permukaan yaitu dalam bentuk timbal ionik (Wuana dan Okieimen, 2011).

Solidifikasi/stabilisasi (S/S) dinilai sebagai metode yang tepat untuk mengatasi persoalan ini. Solidifikasi merupakan pencampuran bahan aditif ke dalam limbah untuk diubah menjadi struktur monolit padat. Proses ini termasuk pengeringan fisik limbah dan peningkatan sifat fisik limbah. Sedangkan stabilisasi merupakan proses pengubahan bahan/partikel aditif dan kontaminan menjadi bentuk yang lebih stabil secara kimiawi. Stabilisasi biasanya dilakukan untuk limbah yang mengandung logam beracun seperti timbal (R. Singh dan Budarayavalasa, 2021). Metode tersebut relatif cepat, ekonomis dan nyaman. Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (U.S EPA) menganggap S/S sebagai teknologi terbaik untuk menangani limbah B3 (J. S. Li dkk., 2014). Sehingga solidifikasi/stabilisasi telah terbukti menjadi metode yang paling praktis dan menjanjikan (C. Li dkk., 2017).

*Fly ash* merupakan partikel halus hasil pembakaran batu bara yang terbawa dalam bentuk abu oleh gas buang di pembangkit tenaga listrik (Fauzi dkk., 2016). Komposisi kimia *fly ash* terdiri dari  $\text{SiO}_2$  48,67%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  29,16%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  8,98%;  $\text{CaO}$  4,73%;  $\text{TiO}_2$  2,75%;  $\text{K}_2\text{O}$  2,66%; dan  $\text{MgO}$  0,74% (Liu dkk., 2021). Geopolimer disebut aluminosilikat teraktivasi alkali (Andini dkk., 2008). Geopolimer dibuat dengan mengaktifkan bahan sumber yang mengandung silika dan alumina seperti *fly ash* dengan larutan alkali dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (*water glass*). Hal tersebut bertujuan agar dihasilkan ikatan polimer Si-O-Al pada *fly ash*. Geopolimerisasi ini menghasilkan jaringan aluminosilikat amorf tiga dimensi (N. B. Singh, 2018), (San dkk., 2014). Keunggulan utama geopolimer ialah dalam hal solidifikasi/stabilisasi ion logam berat melalui enkapsulasi fisik, penyerapan permukaan dan ikatan kimia (Xiaolu dan Jiabao, 2019).

Pada penelitian ini, hasil akhir dari solidifikasi/stabilisasi ion Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* ialah dalam bentuk campuran padat. Sifat mekanik material tersebut diketahui dari nilai kuat tekan yang diujikan. Kemudian pengujian *leaching out* konsentrasi ion Pb(II) dari campuran padat dilakukan menggunakan instrumen ICP-OES. Sedangkan analisis struktur campuran padat dilakukan menggunakan instrumen FTIR.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan secara kualitatif dan kuantitatif

### 2.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama 3 bulan di Universitas Negeri Padang

### 2.3 Target/Subjek Penelitian

Variabel penelitian

a. Variabel kontrol:

- 1) *Fly ash*
- 2)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  pekat
- 3)  $\text{HNO}_3$  pekat
- 4)  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (*Water glass*)
- 5) NaOH
- 6) Aquadest

b. Variabel bebas:

- 1)  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$

c. Variabel terikat:

- 1) Sifat mekanik (kuat tekan)
- 2) Konsentrasi *leaching out*
- 3) Analisis FTIR

## 2.4 Prosedur

### 1. Solidifikasi/Stabilisasi Ion Pb(II) Menggunakan Geopolimer Berbasis *Fly Ash*

Penelitian ini menetapkan lima variasi persentase konsentrasi Pb(II) yaitu, 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5%; dan 3,0% yang diperoleh dari perhitungan masing-masing massa  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ . Selanjutnya untuk perbandingan komposisi dari bahan lain yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Bahan untuk Solidifikasi/Stabilisasi Ion Pb(II) Menggunakan Geopolimer Berbasis *Fly Ash*

No.	Konsentrasi Pb(II) (%)	Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (g)	Water Glass (g)	Fly Ash (g)	NaOH (g)	Aquadest (g)
1	1,0	3,99	74,79	250	11,95	26,2
2	1,5	5,99	74,79	250	11,95	26,2
3	2,0	7,99	74,79	250	11,95	26,2
4	2,5	9,99	74,79	250	11,95	26,2
5	3,0	11,99	74,79	250	11,95	26,2

$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  dilarutkan dalam air hingga homogen. Kemudian, larutan tersebut dicampurkan dengan *fly ash* yang telah diaktivasi dengan NaOH dan telah disaring sebelumnya sehingga berukuran 200 mesh. Pengadukan dilakukan selama 3 menit hingga campuran membentuk pasta. Sampel campuran dibuat duplo untuk masing-masing variasi dengan tujuan untuk mengamati pengaruh 2 waktu pengawetan yang berbeda. Campuran yang telah dibuat, dituangkan ke dalam cetakan berdimensi 4×4×4 cm dan dihentakkan selama 1 menit agar merata. Untuk mencegah terjadinya penguapan air, cetakan berisi campuran tersebut ditutup dengan plastik film. Sebelum ditempatkan dalam *box* pengawetan khusus selama 24 jam bersuhu 65°C, cetakan berisi campuran tersebut didiamkan selama 2 jam pada suhu ruang. Lalu cetakan dikeluarkan dan dilanjutkan dengan tahap akhir, yaitu pengawetan tertutup selama 3 hari, dan 7 hari sebagai bentuk variabel waktu (Liu dkk., 2021). Spesimen yang telah dibuat, diuji kuat tekannya yang mengacu pada pengujian kuat tekan semen (Y. Wang dkk., 2022).

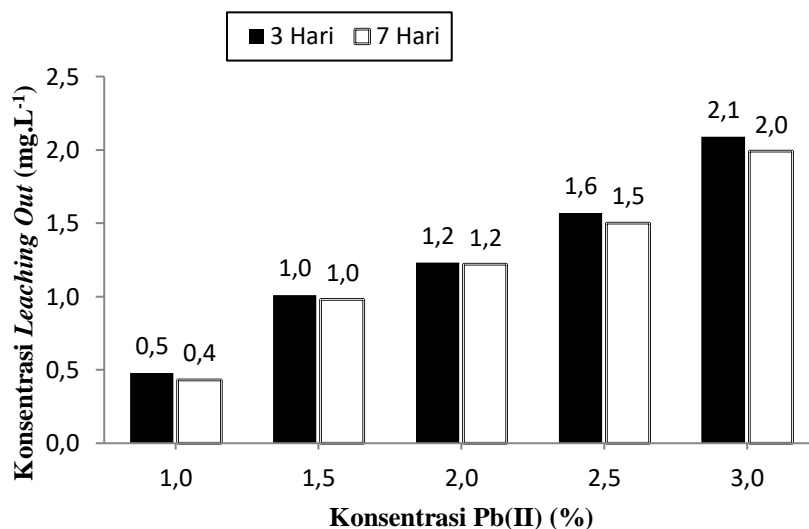
### 2. Uji *Leaching Out* Konsentrasi Ion Pb(II)

Sebanyak 5 gram spesimen dari hasil solidifikasi ditempatkan ke dalam botol sentrifus 50 ml. Lalu ditambahkan 50 mL larutan ekstraksi pH  $3,20 \pm 0,05$  yang dibuat dari campuran asam nitrat pekat dan asam sulfat pekat 1:2. Kemudian botol diagitasi selama  $18 \pm 2$  jam dengan kecepatan  $32 \pm 2$  rpm menggunakan *rotary agitator*. Selanjutnya dilakukan penyaringan agar diperoleh filtrat yang jernih. Konsentrasi ion Pb(II) dalam filtrat dianalisis menggunakan ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry*) (R. Wang et al., 2020).

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 *Leaching Out* Konsentrasi Ion Pb(II)

Keseluruhan pola *leaching out* ion Pb(II) untuk setiap variasi konsentrasi Pb(II) dari hasil solidifikasi ion Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash*, tersaji pada Gambar 1.



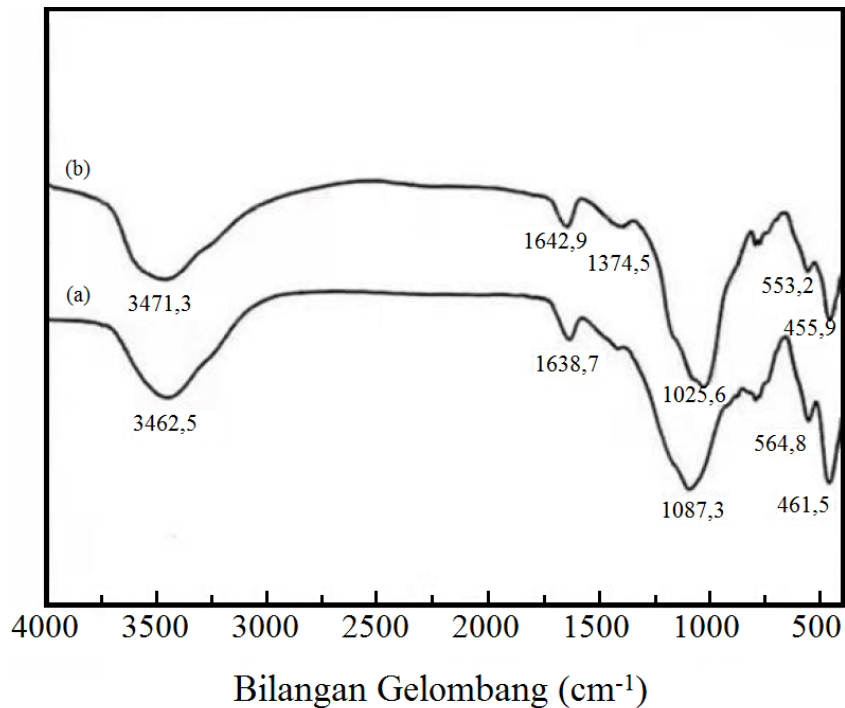
Gambar 1. Hasil uji *leaching out* ion Pb(II)

Terjadi peningkatan konsentrasi *leaching out* ion Pb(II) seiring dengan peningkatan kandungannya pada durasi pengawetan 3 dan 7 hari sampel padatan campuran. Konsentrasi *leaching out* ion Pb(II) pada konsentrasi Pb(II) 1,0% hingga 2,0%, masih berada di bawah nilai standar maksimum yaitu 5 mg.L<sup>-1</sup> (Su dkk., 2020) untuk waktu pengawetan 3 dan 7 hari. Hal tersebut dapat disebabkan oleh Pb(II) yang terikat cukup kuat pada struktur aluminium-oksigen (Al-O) dan silikon-oksigen (Si-O) dalam struktur internal *fly ash*, sehingga sulit untuk didegradasi dalam lingkungan asam. Sedangkan untuk konsentrasi Pb(II) di atas 2,0% (2,5% dan 3,0%), nilai *leaching out* melebihi batas standar maksimum. Hal itu dapat disebabkan oleh struktur internal maupun eksternal dari campuran tersebut mengalami penyerangan oleh lingkungan asam secara signifikan, sehingga menyebabkan migrasi ion Pb(II) keluar dari struktur campuran yang mengandung aluminosilikat tersebut. Pada akhirnya, dapat disimpulkan bahwa konsentrasi optimum hasil *leaching out* Pb(II) adalah 2,0%. Pada konsentrasi itu menunjukkan bahwa solidifikasi menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* dalam suasana asam optimum pada konsentrasi Pb(II) tersebut.

#### 3.2 FTIR

Spektrum IR dari geopolimer berbasis *fly ash* dan Pb(II) yang disolidifikasi menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* ditunjukkan pada Gambar 2. Spektrum *infrared* dari geopolimer berbasis *fly ash* (a) mengindikasikan vibrasi *stretching* O-H pada 3462,5 cm<sup>-1</sup> dan vibrasi *bending* O-H pada 1638,7 cm<sup>-1</sup>. Sedangkan spektrum Pb(II) yang disolidifikasi menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* (b) menunjukkan vibrasi *stretching* O-H pada 3471,3 cm<sup>-1</sup> dan vibrasi *bending* O-H pada 1642,9 cm<sup>-1</sup>. Hal itu diduga karena keberadaan molekul H<sub>2</sub>O (Paaver dkk., 2021) yang terikat di dalam struktur aluminosilikat dan juga pada struktur Pb(II) yang disolidifikasi menggunakan geopolimer berbasis *fly ash*. Kemudian untuk masing-masing spektrum (a) dan (b), pada 1087,3 cm<sup>-1</sup> dan 1025,6 cm<sup>-1</sup> menunjukkan vibrasi *stretching* Si-O-Si atau Si-O-Al (Mužek dkk., 2013). Pada spektrum (b), vibrasi *stretching* tersebut diasumsikan terjadi akibat Pb(II) yang terikat pada struktur aluminosilikat dari geopolimer berbasis *fly*

*ash*, sehingga menyebabkan pergeseran pada puncak serapan. Dengan kata lain, vibrasi tersebut ternyata dipengaruhi oleh keberadaan Pb(II). Selanjutnya, puncak serapan (a) dan (b), masing-masing sekitar  $564,8 \text{ cm}^{-1}$  dan  $553,2 \text{ cm}^{-1}$  yang sesuai dengan vibrasi *stretching* Al-O-Si (Cheng dkk., 2018). Sedangkan vibrasi *bending* Al-O atau Si-O berada di sekitar  $461,5 \text{ cm}^{-1}$  (Mužek dkk., 2013) dan  $455,9 \text{ cm}^{-1}$  untuk masing-masing spektrum (a) dan (b).



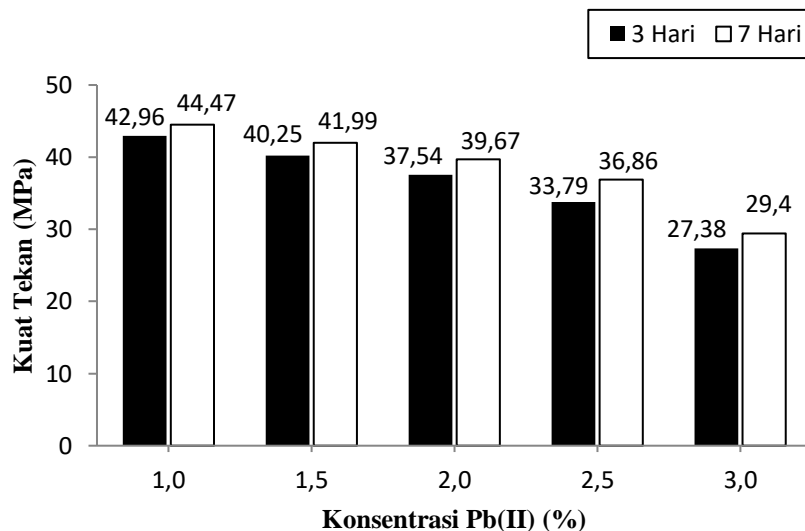
Gambar 2. Spektrum IR (a) geopolimer berbasis *fly ash*, (b) campuran Pb(II) dengan geopolimer berbasis *fly ash*

Analisis puncak serapan lainnya yaitu pada bilangan gelombang sekitar  $1374,5 \text{ cm}^{-1}$  yang hanya terdapat pada spektrum (b). Hal itu berkemungkinan disebabkan oleh penambahan Pb(II) dalam bentuk  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  yang mengandung nitrat pada saat proses solidifikasi, sehingga anion nitrat (Bellamy, 1975) ikut terlibat pada sistem tersebut. Dari spektrum (a) maupun (b), tidak terlihat perbedaan yang signifikan dari masing-masing posisi puncak serapan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa masih terdapat konsistensi pada masing-masing dari kedua spektrum IR tersebut. Selain itu, diperkirakan struktur utama dari Pb(II) yang disolidifikasi dengan geopolimer berbasis *fly ash* tersebut membentuk kompleks tiga dimensi akibat polimerisasi silika-oksigen (Si-O) dan aluminium-oksigen (Al-O) tetrahedral (Allahverdi dan Škvára, 2001).

### 3.3 Kuat Tekan

Pengaruh nilai kuat tekan terhadap durasi pengawetan sampel padatan campuran dari solidifikasi Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash*, ditunjukkan pada Gambar 3. Dari Gambar 3 di atas, terjadi penurunan nilai kuat tekan dari solidifikasi Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* pada masing-masing durasi waktu, baik dalam jangka waktu pengawetan 3 maupun 7 hari. Penurunan nilai tersebut berbanding terbalik dengan nilai konsentrasi Pb(II) dalam campuran padat. Dengan kata lain, semakin tinggi konsentrasi Pb(II), maka semakin menurun kekuatan tekan campuran padat tersebut. Diamati dari durasi waktu, selisih nilai kuat tekan antara waktu pengawetan 3 hari dan 7 hari untuk

masing-masing konsentrasi Pb(II) berturut-turut yaitu, 1,51%; 1,75%; 2,13%; 3,07%; dan 2,02%. Maka, dapat disimpulkan bahwa pengaruh waktu pengawetan dapat meningkatkan nilai kuat tekan campuran padat dari solidifikasi Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash*. Berbeda halnya jika diamati dari konsentrasi Pb(II). Nilai kuat tekan standar campuran padat pada waktu 3 hari maupun 7 hari untuk konsentrasi Pb(II) 1,0%-1,5% yaitu dalam rentang 40 Mpa, sehingga masih dikategorikan memiliki sifat mekanik yang baik dan dapat dipertahankan. Sedangkan untuk konsentrasi Pb(II) yang tinggi, yaitu 2,0%



Gambar 3. Hasil uji kuat tekan campuran dari solidifikasi Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash*

hingga 3,0%, terjadi penurunan nilai kuat tekan yang cukup tajam. Hal tersebut dapat disebabkan oleh keberadaan Pb(II) yang menghambat reaksi polimerisasi hingga pada batas tertentu, serta juga dapat dipengaruhi oleh struktur internal dari campuran padat (Xiaolu dan Jiabao, 2019).

## 4. SIMPULAN DAN SARAN

### 4.1 Simpulan

*Leaching out* bertujuan untuk mengetahui kemampuan ion Pb(II) bertahan dalam suatu matriks padat geopolimer berbasis *fly ash*. Durasi pengawetan sangatlah berpengaruh terhadap konsentrasi *leaching out*. Semakin lama durasi pengawetan maka semakin rendah konsentrasi *leaching out*. Dilihat dari sifat mekanik, ternyata kuat tekan campuran hasil solidifikasi ion Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* mengalami penurunan seiring dengan tingginya penambahan konsentrasi Pb(II). Kuat tekan optimum dari campuran padat dari Pb(II) dan geopolimer berbasis *fly ash* terdapat pada konsentrasi 2,0% yaitu sekitar 40 MPa dengan kondisi *leaching out* yang masih memenuhi standar. Sedangkan hasil analisis secara struktur dari campuran padat tersebut menggunakan FTIR, mengungkapkan bahwa solidifikasi Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* menghasilkan struktur yang padat dan baik. Maka, telah diketahui bahwa solidifikasi Pb(II) menggunakan geopolimer berbasis *fly ash* memiliki kinerja yang baik jika diamati dari kuat tekan maupun konsentrasi *leaching out*. Sehingga material solid tersebut dapat direkomendasikan sebagai material konstruksi tepat guna yang memiliki ketahanan terhadap suasana asam.

## 4.2 Saran

Diharapkan geopolimer berbasis *fly ash* dijadikan sebagai variabel bebas yang divariasikan terhadap variabel kontrol konsentrasi Pb(II) pada penelitian selanjutnya, guna untuk melihat perbandingan konsentrasi *leaching out* ion logam serta sifat mekaniknya.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Allahverdi, A., dan Škvára, F. (2001). Nitric acid attack on hardened paste of geopolymeric cements. *Ceramics - Silikaty*, 45(4), 143–149.
- Andini, S., Cioffi, R., Colangelo, F., Grieco, T., Montagnaro, F., dan Santoro, L. (2008). Coal fly ash as raw material for the manufacture of geopolymer-based products. *Waste Management*, 28(2), 416–423. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.02.001>
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., dan Sadeghi, M. (2021). Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12(April), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- Bellamy, L. J. (1975). Nitro- and Nitroso-Compounds, Nitrates and Nitrites. In *The Infra-red Spectra of Complex Molecules* (1st ed., pp. 331–332). Springer Dordrecht. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-011-6017-9>
- Cheng, T., Chen, C., Tang, R., Han, C. H., dan Tian, Y. (2018). Competitive adsorption of Cu, Ni, Pb, and Cd from aqueous solution onto fly ash-based linde F(K) Zeolite. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 37(1), 61–72.
- Chheang, L., Thongkon, N., Sriwiriyarat, T., dan Thanasupsin, S. P. (2021). Heavy metal contamination and human health implications in the chan thnal reservoir, Cambodia. *Sustainability (Switzerland)*, 13(24), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su132413538>
- Fauzi, A., Nuruddin, M. F., Malkawi, A. B., dan Abdullah, M. M. A. B. (2016). Study of Fly Ash Characterization as a Cementitious Material. *Procedia Engineering*, 148, 487–493. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.535>
- Gu, S., Kang, X., Wang, L., Lichtfouse, E., dan Wang, C. (2019). Clay mineral adsorbents for heavy metal removal from wastewater: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 17(2), 629–654. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0813-9>
- Li, C., Wen, Q., Hong, M., Liang, Z., Zhuang, Z., dan Yu, Y. (2017). Heavy metals leaching in bricks made from lead and zinc mine tailings with varied chemical components. *Construction and Building Materials*, 134, 443–451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.076>
- Li, J. S., Xue, Q., Wang, P., Li, Z. Z., dan Liu, L. (2014). Effect of drying-wetting cycles on leaching behavior of cement solidified lead-contaminated soil. *Chemosphere*, 117(1), 10–13. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.045>
- Liu, F., Tang, R., Wang, B., dan Yuan, X. (2021). Experimental study on solidification of microorganism-mixing-improved percolating sand. *Shuili Fadian Xuebao/Journal of Hydroelectric Engineering*, 40(12), 96–105. <https://doi.org/10.11660/slfdx.20211209>
- Mužek, M. N., Svilović, S., dan Zelić, J. (2013). Fly ash-based geopolymeric adsorbent for copper ion removal from wastewater. *Desalination and Water Treatment*, 52(13–15), 2519–2526. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.792015>
- Paaver, P., Paiste, P., Liira, M., dan Kirsimäe, K. (2021). Mechanical activation of the ca-rich circulating fluidized bed combustion fly ash: Development of an alternative binder system. *Minerals*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/min11010003>
- San, K. K., Wai, M. H., dan Lwin, T. (2014). A Study on the Immobilization of Toxic Metal Ions by using Prepared. *Dagon University Research Journal*, 6, 107–123.
- Singh, N. B. (2018). Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. *Minerals*, 8(7), 1–21. <https://doi.org/10.3390/min8070299>

- Singh, R., dan Budarayavalasa, S. (2021). Solidification and stabilization of hazardous wastes using geopolymers as sustainable binders. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(5), 1699–1725. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01245-0>
- Su, P., Liu, Y., Zhang, J., Chen, C., Yang, B., Zhang, C., dan Zhao, X. (2020). Pb-Based Perovskite Solar Cells and the Underlying Pollution behind Clean Energy: Dynamic Leaching of Toxic Substances from Discarded Perovskite Solar Cells. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 11(8), 2812–2817. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c00503>
- Wang, R., Yan, Q., Su, P., Shu, J., Chen, M., Xiao, Z., Han, Y., dan Cheng, Z. (2020). Metal mobility and toxicity of zinc hydrometallurgical residues. *Process Safety and Environmental Protection*, 144, 366–371. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.042>
- Wang, Y., Chen, Y., Guo, B., Zhang, S., Tong, Y., dan Niu, D. (2022). Study on the Strength and Hydration Behavior of Sulfate-Resistant Cement in High Geothermal Environment. *Materials*, 15(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/ma15082790>
- Wuana, R. A., dan Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, 2011, 1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Xia, Y., Li, Y., dan Xu, Y. (2022). Adsorption of Pb(II) and Cr(VI) from Aqueous Solution by Synthetic Allophane Suspension: Isotherm, Kinetics, and Mechanisms. *Toxics*, 10(6), 1–15. <https://doi.org/10.3390/toxics10060291>
- Xiaolu, G. U. O., dan Jiabao, H. (2019). Effects of Cr<sup>3+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, and Pb<sup>2+</sup> on Fly Ash based Geopolymer. *Journal of Wuhan University of Technology*, 34(4), 851–857. <https://doi.org/10.1007/s11595-019-2128-5>