

STUDI EFEKTIVITAS TEKNOLOGI STABILISASI DAN SOLIDIFIKASI LIMBAH SLAG TERKONTAMINASI TIMBAL (Pb) MENGGUNAKAN SEMEN PORTLAND DAN FLY ASH

Fawwaz Naufal Fadilah^{1*}, Gina Lova Sari¹, Venny Ulya Bunga¹

¹Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang, Karawang, Jawa Barat, Indonesia

Penulis Korespondensi: fawwaz366d@gmail.com

Article Info	Abstrak
Article History <i>Received: 20 April 2026</i> <i>Revised: 30 April 2026</i> <i>Published: 30 Juni 2026</i>	Perkembangan sektor industri manufaktur di Indonesia, khususnya industri logam dan baja, mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Peningkatan aktivitas industri ini mengakibatkan bertambahnya timbulan limbah padat contohnya limbah slag. Slag merupakan residu non-logam yang terbentuk dari proses peleburan dan pemurnian logam, serta berpotensi mengandung berbagai unsur berbahaya. Di Indonesia, sektor industri non-ferrous, menghasilkan slag dalam jumlah yang sangat besar. Slag non-ferrous umumnya mengandung logam berat seperti Timbal (Pb). Timbulan limbah slag nikel di Indonesia dapat mencapai sekitar 13 juta ton per tahun. Besarnya timbulan ini menunjukkan bahwa slag non-ferrous menjadi salah satu kontributor utama limbah industri nasional yang perlu mendapat perhatian serius dalam pengelolannya (Rambak dkk, 2025). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) menggunakan Semen Portland dan Abu Terbang untuk mengimobilisasi Pb dalam limbah slag. Metode yang digunakan melibatkan variasi rasio slag terhadap binder (90:10, 70:30, dan 50:50) dengan komposisi binder konstan sebesar 90% Semen Portland dan 10% Abu Terbang. Efektivitas dievaluasi berdasarkan uji Kuat Tekan dan Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), serta analisis efisiensi biaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi optimum adalah rasio 70:30 (Variasi B). Variasi ini mencapai kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 92,11 ton/m ² , jauh melampaui standar regulasi sebesar 10 ton/m ² . Selain itu, uji TCLP menunjukkan konsentrasi Pb sebesar 0,006 mg/L, jauh di bawah ambang batas 0,5 mg/L (efisiensi imobilisasi 99%). Analisis biaya mengonfirmasi bahwa variasi ini menawarkan keseimbangan terbaik antara kinerja teknis dan efisiensi ekonomi. Disimpulkan bahwa S/S menggunakan Semen Portland dan Abu Terbang sangat efektif untuk mengolah slag yang terkontaminasi timbal.
Keywords <i>Abu Terbang;</i> <i>Timbal (Pb);</i> <i>Semen Portland;</i> <i>Stabilisasi/Solidifikasi;</i>	

PENDAHULUAN

Berkembangnya sektor industri pada saat ini ditandai dengan adanya aktivitas industri manufaktur yang kian variatif. Variasi industri yang berkembang tidak luput dari peningkatan timbulan limbah, baik secara kualitas ataupun kuantitas. Salah satu limbah yang dihasilkan oleh industri baja adalah limbah slag. Di Indonesia, sektor industri non-ferrous, menghasilkan slag dalam jumlah yang sangat besar. Slag non-ferrous umumnya mengandung logam berat seperti Timbal (Pb). Timbulan limbah slag nikel di Indonesia dapat mencapai sekitar 13 juta ton per tahun. Besarnya timbulan ini menunjukkan bahwa slag non-ferrous menjadi salah satu kontributor utama limbah industri nasional yang perlu mendapat perhatian serius dalam pengelolannya (Rambak dkk, 2025).

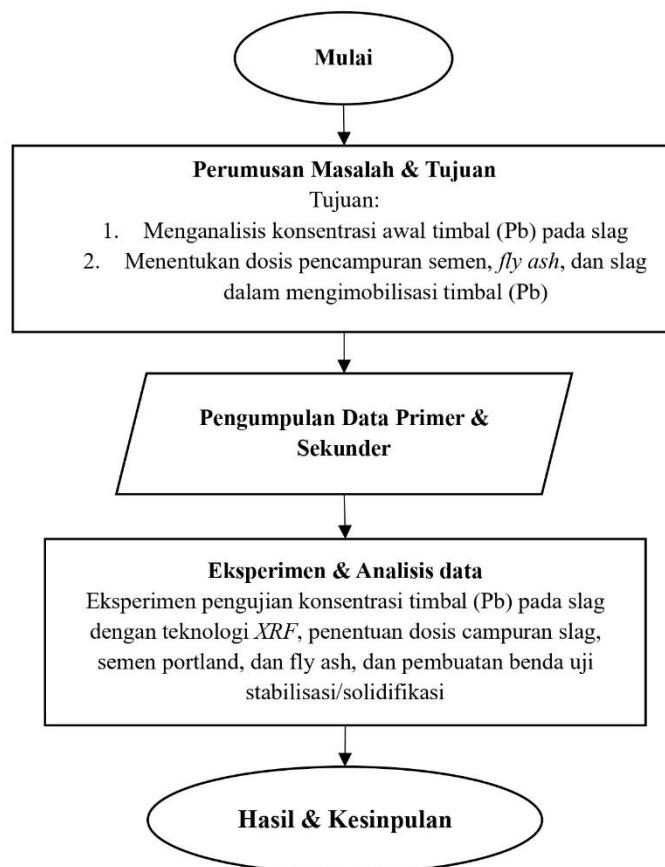
Slag yang terkontaminasi timbal (Pb) dapat menimbulkan risiko bagi manusia dan ekosistem lingkungan yang ada (Wijayati & Purwanti, 2022). Timbal (Pb) juga merupakan salah

satu logam berat yang bersifat toksik dan dapat menyebabkan gangguan kesehatan serius, seperti kerusakan sistem saraf, gangguan fungsi ginjal, dan penurunan kemampuan kognitif. Keberadaan Pb dalam slag meningkatkan risiko pencemaran tanah dan air, terutama melalui proses pelindian apabila limbah tidak distabilisasi dengan baik (Zhang dkk, 2022).

Solusi yang dapat dilakukan dalam kasus ini salah satunya adalah menggunakan teknologi stabilisasi/solidifikasi (S/S) dari limbah B3 dengan cara menambahkan pengikat semen, contohnya fly ash dan semen portland. Stabilisasi dan solidifikasi dalam pengaplikasiannya dapat mengurangi mobilitas senyawa beracun secara signifikan hingga meminimalisir bahaya bagi lingkungan (Anrozi & Trihadiningrum, 2017). Produk hidrasi seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang bersifat tidak larut, sangat membantu dalam mengunci elemen-elemen berbahaya agar tidak menyebar (Xiong dkk, 2022).

Teknologi stabilisasi/solidifikasi juga memberikan stabilitas fisik dan kimia yang tahan lama serta memiliki kekuatan kompresi yang baik (Azzara, 2022). Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas teknologi stabilisasi/solidifikasi (S/S) pada limbah slag terkontaminasi timbal menggunakan semen portland dan fly ash, serta menentukan rasio optimal pencampuran dalam mengimobilisasi timbal (Pb).

METODE PENELITIAN



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi efektivitas stabilisasi/solidifikasi (S/S) pada limbah slag terkontaminasi timbal (Pb). Metode stabilisasi/solidifikasi dipilih karena terbukti efektif dalam mengurangi mobilitas logam berat melalui mekanisme fisik dan kimia, seperti enkapsulasi dan presipitasi (Cahyono et al., 2024).

Bahan dan Prosedur

Bahan utama yang digunakan meliputi slag dari PT X, semen Portland tipe I, dan fly ash tipe C. Konsentrasi awal Pb pada slag serta karakteristik fly ash dianalisis menggunakan X-ray Fluorescence (XRF) mengacu pada US EPA SW-846 Test Method 6200 yang dilakukan di laboratorium PT X di Kalideres, Jakarta Barat. Proses S/S dilakukan dengan variasi komposisi slag: binder sebesar 90:10, 70:30, dan 50:50, dengan komposisi binder tetap 90% semen Portland dan 10% fly ash. Campuran dicetak dalam spesimen kubus $5 \times 5 \times 5$ cm, kemudian curing selama 28 hari dengan metode moisture curing. Kinerja hasil S/S diuji melalui uji kuat tekan mengacu pada SNI 03-1974-1990 yang dilakukan di laboratorium Sofoco, Kebayoran lama, Jakarta Selatan, dan uji TCLP mengacu pada SNI 8808-2019 yang dilakukan di laboratorium Graha Mutu Persada, Depok, Jawa Barat. Untuk menilai imobilisasi Pb, analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil uji terhadap baku mutu, serta ditambahkan analisis efisiensi biaya dan kelayakan bisnis untuk menentukan komposisi optimum.

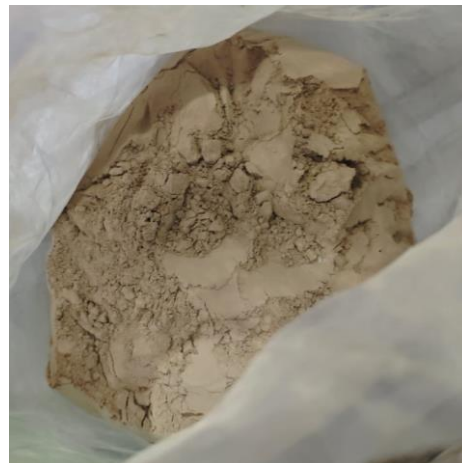
Limbah slag terkontaminasi timbal (Pb) yang digunakan pada penelitian ini didapatkan dari PT X yang bergerak di bidang pengelola limbah berbahaya di Kalideres, Jakarta Barat, gambar slag dapat dilihat pada gambar 2. Semen portland yang digunakan adalah semen portland tipe I dengan merek Semen Merdeka, semen portland dapat dilihat pada gambar 3, sedangkan fly ash yang digunakan adalah tipe C yang didapatkan dari PLTU Paiton, Probolinggo, fly ash dapat dilihat pada gambar 4.



Gambar 2. Slag terkontaminasi Timbal



Gambar 3. Semen Portland



Gambar 1. *Fly Ash* PLTU Paiton

Metode Pengukuran dan pengujian

Slag yang didapatkan dalam bentuk bongkahan dihancurkan dan disaring dengan saringan berukuran 50 mesh atau 0,37mm untuk mendapatkan hasil ukuran sampel yang homogen (Rumahorbo, 2015). Analisis karakteristik konsentrasi timbal (Pb) pada slag menggunakan teknologi X-ray Fluorescence (XRF). Limbah slag kemudian dicampur dengan binder (campuran semen portland dan *fly ash* dengan rasio 90:10). Terdapat tiga variasi komposisi slag:binder yang dibuat, yaitu: Sampel A (90:10), Sampel B (70:30), dan Sampel C (50:50). Dosis campuran binder mengacu pada penelitian Setiawati (2018) dimana dosis semen: *fly ash* 90:10 menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi. Benda uji dicetak berbentuk kubus ukuran 5cm x 5cm x 5cm (Chrislundi, 2015). Sampel kemudian melalui proses curing selama 28 hari menggunakan

teknik moisture curing agar tidak berkontak langsung dengan air untuk mencegah peluluhan logam berat (Pratiwi, 2015).

Uji efektivitas imobilitas meliputi uji kuat tekan dan uji Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP). Uji TCLP memiliki tujuan untuk mengetahui kandungan toksisitas pada benda uji S/S akibat proses pelindian (Chrslundi, 2015). Baku mutu mengacu pada PP No. 22 Tahun 2021 dan Permen LHK No. 6 Tahun 2021. Analisis efisiensi biaya juga dilakukan dengan mengkalkulasi biaya pembuatan tiap variasi komposisi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Material

Tabel 1. Karakteristik fly ash

Elemen	Kandungan (%)	Confidence Interval $\pm 2\sigma$ (%)
Bal	91,580	0,240
Mangan (Mn)	0,135	0,049
Besi (Fe)	7,420	0,240
Nikel (Ni)	0,042	0,016
Seng (Zn)	0,017	0,006
Strontium (Sr)	0,097	0,005
Zirkonium (Zr)	0,028	0,003

Analisis karakteristik kimia material pengikat (binder) berupa *fly ash* tipe C dari PLTU Paiton dilakukan menggunakan teknologi *X-ray Fluorescence* (XRF). Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 1, ditemukan bahwa komponen dominan teridentifikasi sebagai "Bal" (*Balance*) dengan persentase mencapai 91,58%. Penggunaan instrumen X-ray Fluorescence (XRF) dalam mengidentifikasi karakteristik kimia material memiliki keterbatasan fisis yang signifikan dalam mendeteksi elemen ringan dengan nomor atom rendah ($Z < 11$). Fenomena ini terjadi karena elemen ringan memiliki tingkat fluorescence yield yang rendah, di mana energi foton sinar-X yang dipancarkan sangat lemah sehingga mudah diserap oleh udara di dalam ruang sampel atau oleh jendela (*window*) detektor sebelum dapat terdeteksi secara akurat (Zheng dkk, 2023). Hal ini menyebabkan munculnya nilai "Bal" (*Balance*) yang dominan pada hasil pengujian, sebagaimana terlihat pada karakteristik fly ash dalam penelitian ini yang mencapai 91,58%.

Dalam analisis material sementisius, nilai "Bal" ini merepresentasikan unsur-unsur ringan seperti Oksigen (O), Silikon (Si), Aluminium (Al), dan Kalsium (Ca) yang secara kolektif menyusun senyawa oksida utama pembentuk matriks pozzolanic. Unsur-unsur tersebut merupakan komponen fundamental yang menentukan tingkat reaktivitas hidrasi dalam sistem stabilisasi limbah (Kushartomo dkk, 2025).

Kandungan Besi (Fe) pada sampel fly ash yang dianalisis muncul sebagai logam dengan kadar tertinggi dengan kandungan mencapai 7,42%. merupakan karakteristik umum dari abu

terbang hasil pembakaran batubara yang berfungsi meningkatkan densitas matriks material. Keberadaan oksida sementisius yang tinggi ini memicu pembentukan produk hidrasi seperti gel Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H) dan Kalsium Aluminat Hidrat (C-A-H). Sintesis gel C-S-H sangat efektif dalam mengimobilisasi logam berat karena mampu menjerat ion logam secara fisik dalam struktur mikro sekaligus melakukan substitusi kimia pada jaringan silikat (Zhu dkk, 2024).



Gambar 2. Hasil Pengujian Karakteristik Fly Ash

Tabel 2. Karakteristik Slag

Elemen	Kandungan (%)	Confidence Interval $\pm 2\sigma$
		(%)
Bal	48,760	4,130
Mangan (Mn)	0,119	0,051
Besi (Fe)	2,690	0,220
Nikel (Ni)	0,133	0,029
Tembaga (Cu)	0,708	0,071
Seng (Zn)	15,530	1,180
Arsen (As)	0,028	0,126
Perak (Ag)	0,002	0,024
Barium (Ba)	3,520	1,840
Timbal (Pb)	27,59	2,430

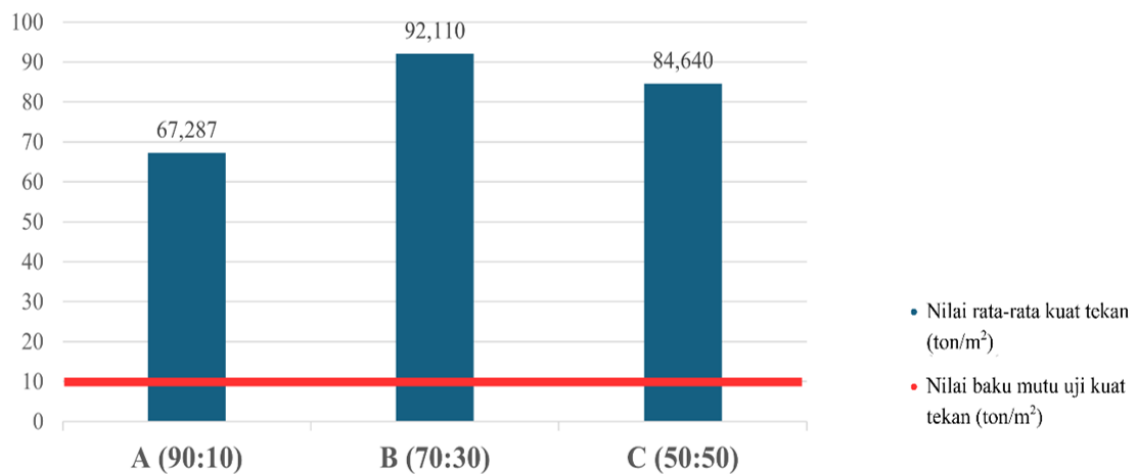
Karakteristik logam berat yang terkandung pada *slag* setelah melalui analisis dengan uji XRF adalah Timbal (Pb) dengan konsentrasi 27,59% dan Seng (Zn) dengan konsentrasi 15,53%. Industri yang menjadi sumber utama slag dengan karakteristik seperti ini adalah industri peleburan sekunder, yang fokus utamanya adalah daur ulang , seperti contohnya industri aki bekas. Aki bekas mengandung beragam komponen kaya timbal, seperti paduan timbal metalik, pasta timbal oksida, dan timbal sulfat, yang menjadi bahan baku utama dalam proses pirometalurgi untuk memulihkan timbal murni. Tingginya kandungan Pb dan Zn secara spesifik

terjadi karena afinitas kimia kedua unsur tersebut terhadap fasa slag silikat pada kondisi tanur (Tang dkk, 2016).



Gambar 3. Hasil Pengujian Karakteristik Slag

Kuat Tekan



Keterangan:

A : 90:10 (270g slag, 27g semen portland, 3g fly ash)

B : 70:30 (210g slag, 81g semen portland, 9g fly ash)

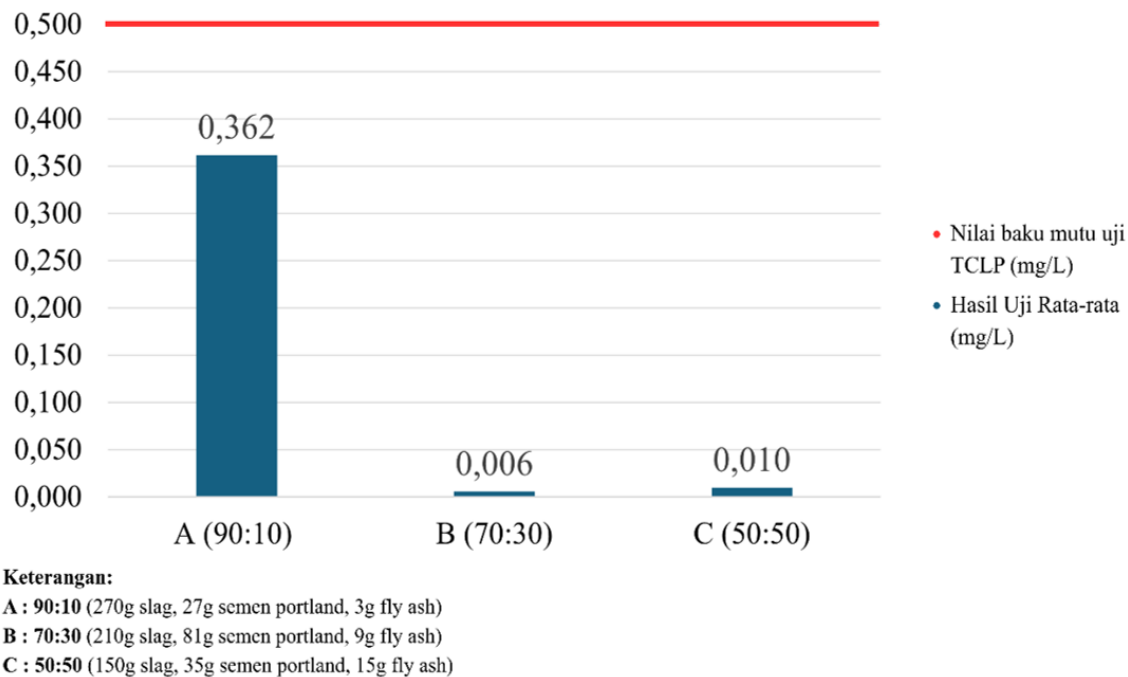
C : 50:50 (150g slag, 35g semen portland, 15g fly ash)

Gambar 4. Hasil Uji Kuat Tekan

Sampel B (70:30) menghasilkan kuat tekan tertinggi yaitu 92,11 ton/m², sedangkan Sampel A (90:10) terendah sebesar 67,29 ton/m². Pencapaian nilai maksimum pada variasi B mengindikasikan bahwa rasio bahan pengikat sebesar 30% merupakan komposisi optimum. Reaksi hidrasi semen Portland menghasilkan fasa-fasa pengikat utama, seperti gel Kalsium Silikat Hidrat (C-S-H) yang efektif mengisi ruang pori (Zheng dkk, 2023).

Pada Sampel C (50:50), kekuatan justru lebih rendah dibandingkan variasi B. Hal ini dapat dilihat pada efek penurunan imbal hasil atau diminishing returns akibat kelebihan semen. Kelebihan semen juga meningkatkan panas hidrasi, yang dapat memicu tegangan termal dan pembentukan retak mikro (Zheng dkk, 2023).

Uji TCLP



Gambar 5. Hasil Uji TCLP

Hasil uji TCLP menunjukkan penurunan konsentrasi Pb terlarut yang sangat signifikan pada seluruh sampel. Data baseline untuk kandungan logam berat pada limbah slag murni ditetapkan melalui uji X-ray Fluorescence (XRF), yang menunjukkan konsentrasi Timbal (Pb) yang sangat signifikan sebesar 27,59%. Kinerja imobilisasi terbaik ditunjukkan oleh Sampel B dengan konsentrasi Pb rata-rata 0,006 mg/L. Nilai ini merepresentasikan efisiensi imobilisasi lebih dari 99%. Keberhasilan ini didasarkan pada kombinasi mekanisme fisik (matriks padat) dan kimia (lingkungan alkalis). Kondisi alkalis mendorong ion Pb^{2+} untuk mengendap sebagai senyawa tak larut seperti timbal hidroksida (Zhu dkk, 2024). Uji Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP) pada slag baseline (tanpa bahan pengikat) tidak dilakukan karena fokus utama penelitian ini adalah mengevaluasi kinerja imobilisasi pada matriks padatan monolitik hasil proses S/S. Secara metodologis, pengujian karakteristik peluluhan dalam sistem S/S merupakan tahap lanjutan yang dilakukan setelah spesimen memenuhi kriteria integritas struktural. Oleh karena itu, pengujian TCLP hanya dilakukan pada benda uji yang telah melalui uji kuat tekan untuk memastikan bahwa matriks pengikat telah terbentuk sempurna dan mampu menahan beban mekanis sesuai standar regulasi (Zheng dkk, 2023).

Sampel A menghasilkan konsentrasi Pb tertinggi (0,36 mg/L) karena kekurangan bahan pengikat menyebabkan matriks lebih berpori (Anrozi & Trihadiningrum, 2017). Temuan ini selaras dengan studi Irawan dkk. (2025), yang juga menemukan bahwa komposisi campuran pengikat semen dan *fly ash* 90:10 sangat efektif menstabilkan logam berat Pb.

Analisis Perhitungan Biaya

Perhitungan biaya tiap benda uji dilakukan berbasis massa bahan yang dipakai (g) dan harga satuan per kilogram. Konversi massa dari gram ke kilogram diperlukan agar satuan konsisten. Semen Merdeka yang digunakan pada penelitian ini dibeli dengan harga Rp 50.000/40kg (1 sak), slag Pb dengan harga Rp 10.000/2kg, fly ash dengan harga Rp 25.000/5kg. Perhitungan biaya dapat dilihat pada Tabel 3

Tabel 3. Karakteristik Slag

Variasi Benda Uji	Dosis	Harga satuan (Rp)			Total Biaya Pembuatan (Rp)
		slag Pb	semen	<i>fly ash</i>	
A (90:10)	270g slag, 27g semen portland, 3g <i>fly ash</i>	270	33,75	15	318,75
B (70:30)	210g slag, 81g semen portland, 9g <i>fly ash</i>	210	101,25	45	356,25
C (50:50)	150g slag, 135g semen portland, 15g <i>fly ash</i>	150	168,75	75	393,75
US EPA	150g slag, 135g semen portland, 15g <i>fly ash</i>	150	168,75	75	393,75

Analisis biaya produksi menunjukkan kenaikan linier seiring peningkatan rasio binder (semen:abu terbang). Variasi A mencatat biaya terendah (Rp 318,75), diikuti Variasi B (Rp 356,25, naik 11,7%), dan Variasi C sebagai titik tertinggi (Rp 393,75, naik 23,5%). Meskipun Variasi A (90:10) paling ekonomis, margin keamanan lingkungannya rendah karena mencatatkan kuat tekan terkecil (67,29 ton/m²) dan kadar Pb tertinggi (0,36 mg/l). Variasi C (50:50) dinilai tidak efisien secara ekonomi maupun teknis; penambahan biaya yang tinggi pada variasi ini justru menurunkan kuat tekan dibandingkan Variasi B akibat fenomena diminishing returns dan potensi retak mikro.

Variasi B (70:30) ditetapkan sebagai dosis optimum dalam penelitian ini. Dengan investasi biaya yang hanya berselisih Rp 37,50 lebih tinggi dari Variasi A, sampel ini memberikan peningkatan performa teknis yang sangat signifikan, yaitu pencapaian kuat tekan maksimum (92,11 ton/m²) dan penurunan konsentrasi lindi Pb yang drastis hingga 0,006 mg/l. Pemilihan

Variasi B menjamin produk S/S yang paling kuat dan aman untuk aplikasi skala besar dibandingkan opsi lainnya.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, limbah slag teridentifikasi memiliki konsentrasi awal logam berat Timbal (Pb) yang sangat tinggi, yakni sebesar 27,59% berdasarkan pengujian baseline menggunakan XRF. Aplikasi teknologi Stabilisasi/Solidifikasi (S/S) menggunakan campuran binder semen Portland dan fly ash terbukti sangat efektif dalam mengimobilisasi kontaminan tersebut. Rasio pencampuran optimum dicapai pada Variasi Sampel B, dengan komposisi 70% slag dan 30% binder.

Secara teknis, Variasi B menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 92,11 ton/m², yang secara signifikan melampaui standar regulasi yang berlaku. Matriks padat yang terbentuk pada variasi ini mampu menurunkan konsentrasi peluluhan Pb secara drastis hingga 0,006 mg/l pada pengujian TCLP, merepresentasikan efisiensi imobilisasi lebih dari 99%. Selain unggul dalam performa teknis, analisis biaya produksi mengonfirmasi bahwa Variasi B merupakan opsi yang paling efisien secara ekonomi untuk diaplikasikan pada skala besar. Variasi ini memberikan tingkat keamanan lingkungan yang jauh lebih baik dibandingkan opsi termurah (Variasi A), serta berhasil menghindari pemborosan biaya dan penurunan performa akibat fenomena diminishing returns yang terjadi pada rasio binder tinggi (Variasi C).

DAFTAR PUSTAKA

- Anrozi, R., & Trihadiningrum, Y. (2017). Kajian Teknologi dan Mekanisme Stabilisasi/Solidifikasi untuk Pengolahan Limbah B3. *Jurnal Teknik ITS*, 6(2). <https://doi.org/10.12962/j23373539.v6i2.25134>.
- Azzara, A. K. (2022). Pengolahan limbah B3 logam berat cadmium (CD) di Laboratorium Kualitas Lingkungan menggunakan metode Stabilisasi/Solidifikasi. <https://dspace.uui.ac.id/handle/123456789/41446>
- Cahyono, L., Carina, A., Pratiwi, W. D., Fardina, F., Widiana, D. R., Utomo, A. R. P., & Fahmi, M. R. (2024). SUSTAINABLE MATERIALS MELALUI SOLIDIFIKASI-STABILISASI LIMBAH SANDBLASTING MENJADI BETON FEROSEMEN. *DEARSIP Journal of Architecture and Civil*, 4(02), 108–118. <https://doi.org/10.52166/dearsip.v4i02.7877>
- Chrislundi, V. (2015). Stabilisasi/Solidifikasi Limbah B-3 Mengandung Logam Berat dan Hidrokarbon dengan Semen Portland dan *Fly ash* (Doctoral dissertation, Tesis]. Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya).
- International Organization for Standardization. (2011). ISO 12677:2011 - Chemical analysis of refractory products by X-ray fluorescence (XRF) - Fused cast-bead method. ISO.
- Irawan, D. S., Alham, M., Sari, D. A. P., & Fadiilah, D. (2025). Optimizing *Fly ash* and Cement Ratios for Immobilizing Lead and Arsenic in Liquid Hazardous Waste. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(1), 20500-20507.
- Kushartomo, W., Wildan, V. A., & Prabowo, A. (2025). The Effect of *Fly ash* Addition in Concrete Mix on Compressive Strength and Durability against Sulfate Attack. *MEDIA*

- KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL, 31(1), 106–113.
<https://doi.org/10.14710/mkts.v31i1.71566>
- Lichtfouse, E., Inamuddin., Ahamed, M.I., Altalhi, T. (2021) Remediation of Heavy Metals. Switzerland: Springer International Publishing.
- Pratiwi, R. M. A. (2015). Stabilisasi/solidifikasi limbah B-3 mengandung logam berat dan hidrokarbon dengan semen portland dan tanah tras (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember). <http://repository.its.ac.id/id/eprint/62943>
- Putra, R. H. S. (2018). Karakteristik Pada Logam Baja Paduan dengan Menggunakan Metoda X-Ray Fluoresence (XRF) dan Optical Emission Spectroscopy (OES). Universitas Negeri Yogyakarta, 134.
- Rambak, E. P., Wardani, A., Darwis, M., Rahman, L., Simanjutak, R. a. H., Badia, B. A., & Idris, M. (2025). Studi Literatur: Potensi Pemanfaatan Slag Nikel sebagai Material Alternatif Ramah Lingkungan dalam Konstruksi Berkelanjutan. MEDIA KONSTRUKSI, 10(1), 140–148. <https://doi.org/10.33772/jmk.v10i1.155>
- Rumahorbo, R. B. (2015). Solidifikasi/Stabilisasi Limbah Slag yang Mengandung Chrom (Cr) dan Timbal (Pb) dari Industri Baja Sebagai Campuran Dalam Pembuatan Concrete (Beton) (Doctoral dissertation, Universitas Sumatera Utara).
- Setiawati, M. (2018, November 11). FLY ASH SEBAGAI BAHAN PENGGANTI SEMEN PADA BETON. Setiawati | Prosiding Semnastek. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/3556/2660>
- Tang, Q., Liu, Y., Gu, F., & Zhou, T. (2016). Solidification/stabilization of fly ash from a municipal solid waste incineration facility using Portland cement. Advances in Materials Science and Engineering, 2016(1), 7101243.
- Wijayati, W. I., & Purwanti, I. (2022). Kajian Remediasi Tanah Terkontaminasi Logam Berat Timbal di Desa Pesarean, Kabupaten Tegal dengan Stabilisasi/Solidifikasi. Jurnal Teknik ITS, 11(2), D28-D33.
- Xiong, X., Zhang, Y., Wang, L., & Tsang, D. C. W. (2022). Chapter 1 - Overview of hazardous waste treatment and stabilization/solidification technology. In D. C. W. Tsang & L. Wang (Eds.), Low Carbon Stabilization and Solidification of Hazardous Wastes (pp. 1–14). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824004-5.00031-1>
- Yusindra, M. R. (2024). Pengaruh Variasi Dosis Biokoagulan Daun Mimba (*Azadirachta indica*) Dan Kecepatan Pengadukan Pada Air Limbah Perikanan (Doctoral dissertation, UIN Ar-Raniry Fakultas Sains dan Teknologi).
- Zhang, F., Li, Y., Zhang, J., Gui, X., Zhu, X., & Zhao, C. (2022). Effects of slag-based cementitious material on the mechanical behavior and heavy metal immobilization of mine tailings based cemented paste backfill. Heliyon, 8(9), e10695. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10695>
- Zheng, C., Xiong, K., Yang, K., & Feng, D. (2023). Experimental study on solidification/stabilization of heavy metal lead and chromium sludge solidified by cement-based materials. MATEC Web of Conferences, 382, 01008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202338201008>
- Zhu, K., Wang, L., Liao, L., Bai, Y., & Hu, J. (2024). Study on synthesis of CSH gel and its immobilization of heavy metals. Crystals, 14(10), 864. <https://doi.org/10.3390/cryst14100864>