

## Analysis of the Potential Use of Mining Waste as Raw Material in the Production of Environmentally Friendly Construction Materials

(Analisis Potensi Pemanfaatan Limbah Pertambangan sebagai Bahan Baku Material Konstruksi Ramah Lingkungan)



Rafiuddin <sup>a,1,\*</sup>, Bunga Hati <sup>a,2</sup>

<sup>a</sup> Engineering Study Program, Faculty of Engineering, Pejuang Republik Indonesia University, Makassar 90234, Indonesia

E-mail: <sup>1</sup>rafiudin1529@email.com, <sup>2</sup>bungahati.2310@gmail.com

\*Corresponding Author.

E-mail address: rafiudin1529@email.com (Rafiuddin).

Received: April 23, 2026 | Revised: April 29, 2026 | Accepted: April 30, 2026



**Abstract:** This study evaluates the feasibility of using three mining-related waste materials, namely tailings, steel slag, and fly ash, as alternative raw materials for environmentally friendly construction products. Although these wastes have been widely examined in previous studies, comparative experimental evidence under a unified testing scheme remains limited, particularly in the Indonesian construction context where material variability and standardization constraints affect field adoption. The novelty of this study lies in positioning the three waste types within the same performance framework by examining compressive strength, water absorption, and corrosion-related durability indicators against a conventional control mixture. Laboratory tests were conducted using a screening-scale experimental design. Compressive strength testing followed the principle of ASTM C39/C39M, water absorption testing followed ASTM C642, and corrosion-related mass/thickness loss evaluation was adapted from laboratory immersion corrosion principles. The results indicate that slag-based specimens showed the highest performance among the waste-based materials, with 28-day compressive strength of 42.1 MPa and water absorption of 3.7%. Fly ash-based specimens reached 36.5 MPa but showed higher water absorption of 6.8%, while tailing-based specimens reached 34.0 MPa with 4.7% water absorption. Compared with the conventional control specimen, the slag-based material achieved approximately 93.6% of the control compressive strength, suggesting its technical potential for selected construction applications after durability and environmental safety validation. The study contributes a comparative performance map and a methodological basis for further optimization of mining waste utilization in sustainable construction materials.

**Keywords:** mining waste; tailings; steel slag; fly ash; sustainable construction; compressive strength; water absorption; corrosion resistance.

**Abstrak:** Penelitian ini mengevaluasi kelayakan pemanfaatan tiga jenis limbah terkait aktivitas pertambangan, yaitu tailing, slag baja, dan fly ash, sebagai bahan baku alternatif untuk material konstruksi ramah lingkungan. Meskipun ketiga jenis limbah tersebut telah banyak dikaji dalam penelitian sebelumnya, bukti eksperimen komparatif dengan skema pengujian yang sama masih terbatas, terutama dalam konteks konstruksi Indonesia yang menghadapi persoalan variasi komposisi material dan keterbatasan standardisasi penerapan di lapangan. Kebaruan penelitian ini terletak pada pemetaan tiga jenis limbah dalam satu kerangka kinerja yang sama melalui pengujian kuat tekan, daya serap air, dan indikator ketahanan terhadap korosi dibandingkan dengan material kontrol konvensional. Pengujian laboratorium dilakukan menggunakan desain eksperimen tahap awal. Uji kuat tekan mengacu pada prinsip ASTM C39/C39M, uji daya serap air mengacu pada ASTM C642, sedangkan evaluasi kehilangan massa dan ketebalan akibat korosi diadaptasi dari prinsip uji imersi laboratorium. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen berbasis slag memiliki performa paling tinggi di antara material berbasis limbah, dengan kuat tekan umur 28 hari sebesar 42,1 MPa dan daya serap air 3,7%. Spesimen berbasis fly



ash mencapai kuat tekan 36,5 MPa tetapi memiliki daya serap air lebih tinggi, yaitu 6,8%, sedangkan spesimen berbasis tailing mencapai 34,0 MPa dengan daya serap air 4,7%. Dibandingkan dengan spesimen kontrol, material berbasis slag mencapai sekitar 93,6% kuat tekan kontrol, sehingga berpotensi digunakan pada aplikasi konstruksi tertentu setelah validasi ketahanan jangka panjang dan keamanan lingkungannya. Penelitian ini berkontribusi dalam menyediakan peta kinerja komparatif serta dasar metodologis untuk pengembangan material konstruksi berkelanjutan berbasis limbah pertambangan.

**Kata kunci:** limbah pertambangan; tailing; slag baja; fly ash; konstruksi berkelanjutan; kuat tekan; daya serap air; ketahanan korosi.

## Pendahuluan

Industri pertambangan menghasilkan volume limbah padat dalam jumlah besar yang berpotensi menimbulkan tekanan lingkungan melalui perubahan kualitas tanah, air, dan udara apabila tidak dikelola secara memadai. Di sisi lain, sektor konstruksi membutuhkan material dalam jumlah besar, terutama semen, agregat, dan bahan pengisi, yang produksinya berimplikasi pada konsumsi sumber daya alam serta peningkatan emisi lingkungan. Keterhubungan kedua persoalan tersebut membuka peluang penerapan konsep ekonomi sirkular, yaitu dengan mengalihkan sebagian limbah pertambangan menjadi bahan baku alternatif untuk material konstruksi.

Pemanfaatan tailing, slag baja, dan fly ash dalam produk konstruksi telah banyak dikaji. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa tailing dapat digunakan sebagai substitusi agregat atau bahan pengisi, slag baja mampu meningkatkan karakteristik mekanik, sedangkan fly ash berperan sebagai material pozzolan yang memperbaiki mikrostruktur beton (Argane et al., 2015; Bharadwaj et al., 2023; Ghazi et al., 2022; Ren & Li, 2023; Thomas, 2013). Namun demikian, hasil penelitian tersebut tidak selalu dapat diterapkan secara langsung lintas lokasi karena variasi karakteristik limbah, baik dari segi komposisi kimia, ukuran partikel, maupun potensi kontaminan.

Keterbatasan utama penelitian terdahulu terletak pada minimnya pendekatan komparatif dalam satu kerangka pengujian yang seragam. Banyak studi hanya berfokus pada satu jenis limbah atau satu parameter kinerja, sehingga sulit untuk menentukan prioritas pemanfaatan limbah secara objektif. Untuk memperjelas posisi penelitian ini terhadap studi sebelumnya, sintesis literatur dan kesenjangan penelitian disajikan pada [Tabel 1](#).

**Tabel 1.** Sintesis Literatur dan Gap Penelitian

Aliran Literatur	Temuan Utama	Keterbatasan	Posisi Penelitian
Tailing sebagai agregat/pengisi	Dapat digunakan dalam mortar dan beton	Variasi komposisi dan pelindian belum diuji simultan	Dibandingkan dengan slag dan fly ash
Slag baja sebagai agregat	Mendukung kuat tekan tinggi	Risiko ekspansi dan stabilitas volume	Evaluasi komparatif
Fly ash sebagai pozzolan	Meningkatkan mikrostruktur	Performa awal rendah	Analisis umur beton
Kajian lingkungan	Mengurangi eksploitasi sumber daya	Tidak selalu aman	Tahap awal sebelum uji lanjutan

Dalam konteks Indonesia, permasalahan ini semakin relevan karena pemanfaatan limbah pertambangan belum sepenuhnya didukung oleh basis data material yang terstandar. Meskipun SNI 03-2834-2000 telah mengatur tata cara perancangan campuran beton normal, penerapannya pada material berbasis limbah membutuhkan verifikasi tambahan. Oleh karena itu, penelitian ini tidak hanya berfokus pada pemanfaatan limbah, tetapi juga pada pemetaan kinerja komparatif beberapa jenis limbah dalam kondisi pengujian yang terkontrol dan seragam.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja material konstruksi berbasis tailing, slag, dan fly ash melalui parameter kuat tekan, daya serap air, serta indikator ketahanan terhadap degradasi. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis faktor teknis yang memengaruhi perbedaan performa antarjenis limbah, serta merumuskan implikasi awal bagi pengembangan material konstruksi ramah lingkungan berbasis limbah pertambangan di Indonesia.

## Metode

### Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen laboratorium komparatif untuk mengevaluasi kinerja material konstruksi berbasis limbah pertambangan. Desain yang digunakan adalah *screening experiment*, yaitu pengujian tahap awal untuk membandingkan kecenderungan performa tiga jenis limbah utama, yaitu tailing, slag, dan fly ash. Spesimen kontrol dibuat menggunakan campuran konvensional tanpa penambahan limbah sebagai pembanding.

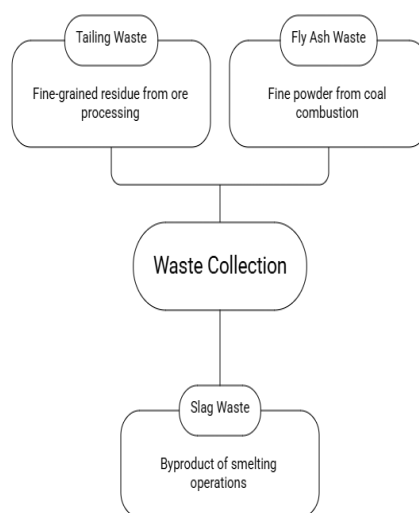
### Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan meliputi semen Portland, agregat halus, agregat kasar, air, serta tiga jenis limbah, yaitu tailing, slag, dan fly ash. Seluruh limbah diperoleh dari Laboratorium Fakultas Teknik UPRI. Sebelum digunakan, material dikeringkan, dibersihkan, dan disaring untuk memperoleh ukuran partikel yang seragam. Komposisi campuran penelitian disajikan pada [Tabel 2](#).

**Tabel 2.** Rancangan Campuran Material

Kode	Limbah	Fungsi	Proporsi	Keterangan
K	-	Kontrol	0%	Beton normal
T	Tailing	Substitusi agregat halus	0.49	Dibandingkan kontrol
S	Slag	Substitusi agregat	0.49	Dibandingkan kontrol
F	Fly ash	Substitusi semen	0.49	Dibandingkan kontrol

Untuk memperjelas tahapan penelitian, proses pengumpulan dan pengolahan material limbah ditunjukkan pada [Gambar 1](#).



**Gambar 1.** Proses Awal Pengumpulan Material Limbah

[Gambar 1](#) menunjukkan tahapan penelitian yang meliputi pengumpulan limbah, pengeringan, penyaringan, hingga persiapan material sebelum pencampuran.

Selanjutnya, bahan ditimbang sesuai komposisi, dicampur hingga homogen, dan dituangkan ke dalam cetakan. Spesimen dipadatkan secara konsisten, kemudian dilepas setelah 24 jam dan dirawat hingga umur 7, 14, dan 28 hari.

### Prosedur Pengujian

Pengujian kuat tekan dilakukan mengacu pada ASTM C39/C39M. Daya serap air diuji berdasarkan ASTM C642, sedangkan ketahanan degradasi dievaluasi melalui kehilangan massa dengan mengadaptasi ASTM G31.

**Tabel 3.** Parameter Pengujian

Parameter	Standar	Indikator	Umur
Kuat tekan	ASTM C39	$f_c = P/A$	7,14,28
Daya serap	ASTM C642	% absorpsi	7,14,28
Degradasi	ASTM G31	kehilangan massa	7,14,28

### Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif melalui nilai rata-rata dan perbandingan terhadap kontrol. Kinerja relatif dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Kinerja Relatif (\%)} = (\text{Nilai Campuran} / \text{Nilai Kontrol}) \times 100 \tag{1}$$

Apabila tersedia replikasi, analisis dilanjutkan dengan ANOVA satu arah dan uji Tukey pada taraf signifikansi 5%.

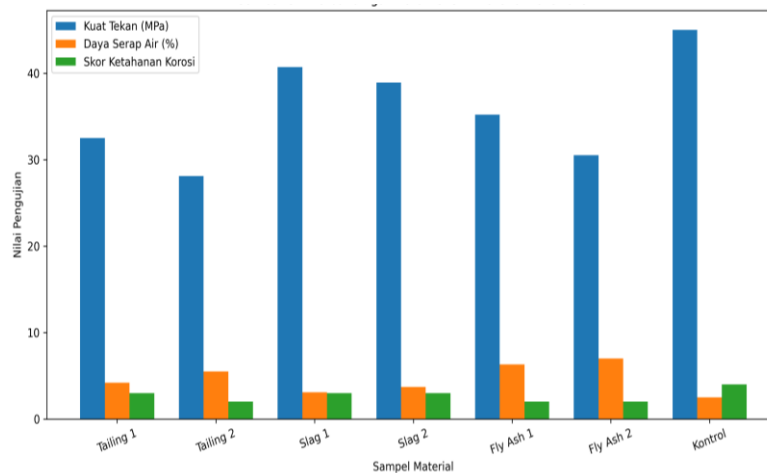
## Hasil

### Hasil Pengujian Kinerja Material

Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan performa antarjenis limbah. Secara umum, spesimen berbasis slag menunjukkan kinerja mekanik terbaik di antara material berbasis limbah, sedangkan fly ash menunjukkan kuat tekan cukup baik tetapi memiliki daya serap air relatif tinggi. Tailing menunjukkan kinerja yang masih berada pada kategori potensial, namun lebih sensitif terhadap variasi komposisi dan ukuran partikel.

**Tabel 5.** Ringkasan Kinerja Material Konstruksi Berbasis Limbah Pertambangan

Sampel Material	Jenis Limbah	Kuat Tekan (MPa)	Daya Serap Air (%)	Ketahanan Korosi
Beton dari Tailing 1	Tailing	32,5	4,2	Baik
Beton dari Tailing 2	Tailing	28,1	5,5	Cukup baik
Beton dari Slag 1	Slag	40,7	3,1	Baik
Beton dari Slag 2	Slag	38,9	3,7	Baik
Beton dari Fly Ash 1	Fly ash	35,2	6,3	Cukup baik
Beton dari Fly Ash 2	Fly ash	30,5	7,0	Cukup baik
Beton kontrol	-	45,0	2,5	Sangat baik



Gambar 2. Perbandingan Karakteristik Material Konstruksi dari Berbagai Jenis Limbah Pertambangan

### Perkembangan Kuat Tekan pada Umur 7, 14, dan 28 Hari

Tabel 6. Perkembangan Kuat Tekan dan Kinerja Relatif

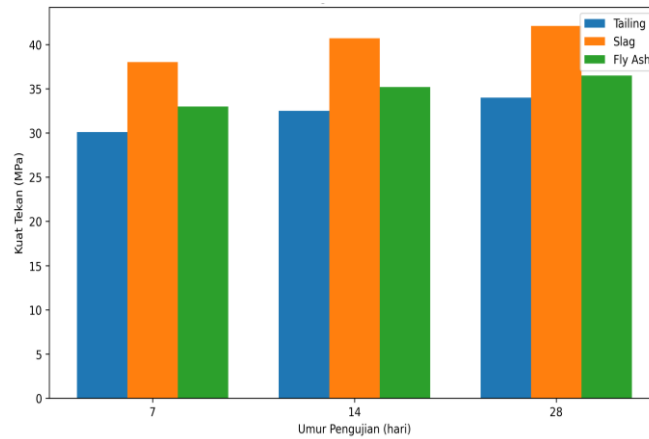
Sampel	7 Hari (MPa)	14 Hari (MPa)	28 Hari (MPa)	Kinerja Relatif terhadap Kontrol 28 Hari
Tailing	30,1	32,5	34,0	75,6%
Slag	38,0	40,7	42,1	93,6%
Fly ash	33,0	35,2	36,5	81,1%
Kontrol	-	-	45,0	100%

Data pada Tabel 6 menunjukkan bahwa seluruh material berbasis limbah mengalami peningkatan kuat tekan dari umur 7 ke 28 hari. Kenaikan ini menunjukkan bahwa proses hidrasi dan pembentukan ikatan internal material masih berlangsung seiring bertambahnya umur curing. Slag menunjukkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari, yaitu 42,1 MPa atau sekitar 93,6% dari kontrol. Temuan ini mengindikasikan bahwa slag memiliki kompatibilitas lebih baik dengan sistem pengikat semen dibandingkan tailing dan fly ash pada rancangan campuran yang diuji.

Secara mekanistik, performa slag dapat dijelaskan melalui densitas, kekerasan, dan tekstur permukaannya yang mendukung interlocking dengan pasta semen. Hal ini sejalan dengan temuan Díaz-Piloneta et al. (2021) dan Ren dan Li (2023), yang menempatkan slag sebagai material potensial untuk agregat konstruksi setelah stabilitas volume dan aspek lingkungannya dikendalikan. Namun, performa tinggi slag tidak boleh langsung ditafsirkan sebagai kelayakan penuh, karena uji ekspansi, pelindian, dan durabilitas jangka panjang tetap diperlukan.

Fly ash menunjukkan kuat tekan 36,5 MPa pada umur 28 hari. Nilai ini lebih rendah daripada slag tetapi tetap menunjukkan potensi teknis. Kinerja fly ash dapat dipengaruhi oleh reaksi pozzolanik yang umumnya lebih berkembang pada umur lebih panjang. Oleh sebab itu, pengujian hingga 56 atau 90 hari diperlukan sebelum menyimpulkan performa final fly ash. Jika hanya dinilai pada umur 28 hari, potensi kontribusi jangka panjang fly ash dapat tereduksi.

Tailing menunjukkan kuat tekan 34,0 MPa pada umur 28 hari. Nilai ini mengindikasikan bahwa tailing dapat berperan sebagai bahan pengisi atau substitusi agregat tertentu, tetapi performanya sangat dipengaruhi oleh distribusi ukuran partikel, kandungan mineral, dan kemungkinan adanya partikel lempung atau unsur kontaminan. Temuan ini konsisten dengan Argane et al. (2015) dan Ghazi et al. (2022), yang menekankan perlunya karakterisasi material sebelum tailing digunakan dalam produk konstruksi.



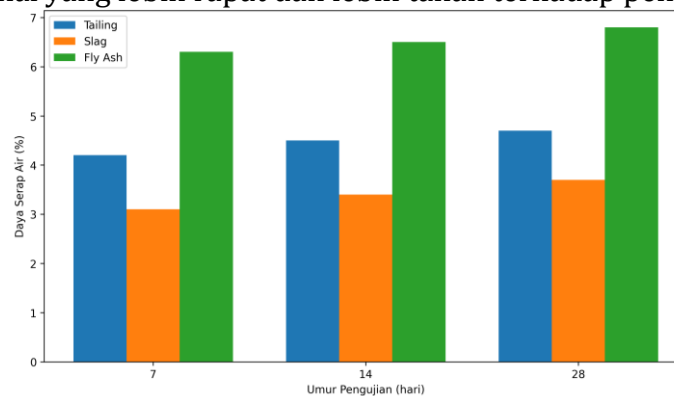
Gambar 3. Perkembangan Kuat Tekan Material Konstruksi pada Umur 7, 14, dan 28 Hari

### Daya Serap Air dan Implikasi Durabilitas

Tabel 7. Hasil Uji Daya Serap Air

Sampel	7 Hari (%)	14 Hari (%)	28 Hari (%)	Interpretasi
Tailing	4,2	4,5	4,7	Porositas sedang; perlu optimasi gradasi
Slag	3,1	3,4	3,7	Daya serap terendah di antara material limbah
Fly ash	6,3	6,5	6,8	Daya serap tertinggi; indikasi pori terbuka lebih besar
Kontrol	-	-	2,5	Acuan pembanding terbaik

Daya serap air merupakan indikator penting karena berhubungan dengan porositas terbuka dan potensi penetrasi air atau ion agresif ke dalam material. Pada umur 28 hari, slag memiliki daya serap air paling rendah di antara material berbasis limbah, yaitu 3,7%. Nilai ini mendukung hasil kuat tekan, karena material dengan porositas lebih rendah umumnya memiliki ikatan internal yang lebih rapat dan lebih tahan terhadap penetrasi fluida.



Gambar 4. Perubahan Daya Serap Air Material Konstruksi pada Umur 7, 14, dan 28 Hari

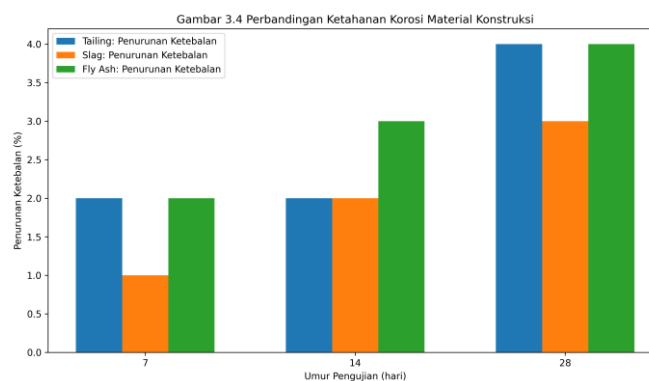
Fly ash memiliki daya serap air tertinggi, yaitu 6,8% pada umur 28 hari. Kondisi ini dapat disebabkan oleh belum optimalnya proporsi campuran, kebutuhan air yang lebih tinggi, atau distribusi partikel yang menghasilkan pori kapiler lebih banyak. Dalam konteks konstruksi, nilai serap air yang tinggi perlu diatasi melalui optimasi rasio air-pengikat, penggunaan superplasticizer, curing yang lebih baik, atau kombinasi fly ash dengan material reaktif lain. Dengan demikian, fly ash tetap potensial, tetapi memerlukan desain campuran yang lebih hati-hati.

**Ketahanan terhadap Korosi/Degradasi**

**Tabel 8.** Evaluasi Ketahanan terhadap Korosi/Degradasi pada Umur 28 Hari

Sampel	Penurunan Berat 28 Hari	Penurunan Ketebalan 28 Hari	Evaluasi
Tailing	2,38%	4%	Baik
Slag	2,50%	3%	Baik
Fly ash	2,17%	4%	Cukup baik

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa tailing dan slag berada pada kategori baik, sedangkan fly ash berada pada kategori cukup baik. Penurunan ketebalan slag sebesar 3% merupakan nilai terendah dalam data 28 hari, sehingga mendukung interpretasi bahwa slag memiliki stabilitas fisik lebih baik pada kondisi uji yang digunakan. Namun, indikator kehilangan massa dan ketebalan masih bersifat awal. Untuk penggunaan struktural, evaluasi korosi tulangan, penetrasi klorida, serangan sulfat, siklus basah-kering, serta pelindian logam berat harus ditambahkan.



**Gambar 5.** Perbandingan Ketahanan Korosi Material Konstruksi Berdasarkan Penurunan Ketebalan

**Diskusi**

**Implikasi Ilmiah dan Praktis**

Secara ilmiah, hasil penelitian ini memperjelas bahwa kelayakan limbah pertambangan tidak dapat digeneralisasi, karena karakteristik fisik, mineralogi, dan reaktivitas masing-masing limbah menentukan mekanisme kontribusinya terhadap kinerja material. Temuan bahwa slag menunjukkan performa paling seimbang pada kuat tekan, daya serap air, dan indikator degradasi mendukung kajian yang menempatkan slag baja sebagai agregat potensial dalam konstruksi, terutama karena sifat mekanik dan tekstur permukaannya dapat memperbaiki interlocking dengan pasta semen (Díaz-Piloneta et al., 2021; Kumar & Shukla, 2023; Ren & Li, 2023). Namun, pemanfaatan slag tetap harus mempertimbangkan stabilitas volume, potensi ekspansi, dan evaluasi lingkungan sebelum diterapkan secara luas (Oluwasola et al., 2014; Ren & Li, 2023).

Fly ash memiliki potensi sebagai material pozzolanik, tetapi performanya sangat dipengaruhi umur curing, rasio air-pengikat, dan tingkat reaktivitas partikel. Literatur menunjukkan bahwa kontribusi fly ash umumnya lebih nyata pada umur lebih panjang karena reaksi pozzolanik memperbaiki mikrostruktur dan densifikasi pasta semen (Bharadwaj et al., 2023; Mehta & Monteiro, 2014; Thomas, 2013). Oleh karena itu, hasil kuat tekan 28 hari dalam penelitian ini belum cukup untuk menilai performa akhir fly ash; pengujian lanjutan pada umur 56 atau 90 hari serta pendekatan aktivasi alkali dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan kinerja campuran (Provis & van Deventer, 2014; Thomas, 2013).

Tailing dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengisi atau substitusi agregat tertentu, tetapi penggunaannya lebih sensitif terhadap variasi komposisi, distribusi ukuran partikel, kandungan mineral, dan potensi unsur pencemar. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa tailing dapat digunakan dalam mortar, beton, atau paving stone, tetapi memerlukan karakterisasi mekanik dan lingkungan agar tidak menimbulkan risiko pelindian atau degradasi durabilitas (Argane et al., 2015; Ghazi et al., 2022; Lam et al., 2020; Rachman et al., 2018). Dengan demikian, klaim pemanfaatan tailing sebagai material ramah lingkungan harus ditempatkan sebagai potensi awal yang masih memerlukan verifikasi keamanan lingkungan.

Secara praktis, slag dapat diprioritaskan untuk penelitian lanjutan pada produk beton non-struktural, paving block, atau elemen konstruksi dengan paparan lingkungan sedang, sedangkan fly ash lebih tepat dikembangkan dalam campuran berbasis semen atau material teraktivasi alkali. Tailing sebaiknya diarahkan pada aplikasi yang toleran terhadap variasi material, seperti bata non-struktural, mortar, atau bahan pengisi. Untuk semua jenis limbah, penerapan lapangan perlu mengikuti prinsip validasi kinerja teknis, pelindian, dan evaluasi siklus hidup agar pengurangan limbah tidak menghasilkan beban lingkungan baru (International Council on Mining and Metals et al., 2020; International Organization for Standardization, 2006a, 2006b). Oleh karena itu, penggunaan material limbah pada aplikasi struktural tidak disarankan sebelum uji durabilitas jangka panjang, uji pelindian, serta penilaian lingkungan dilakukan secara sistematis.

### Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini masih merupakan studi tahap awal. Keterbatasan utama terletak pada belum lengkapnya karakterisasi kimia-mineralogi limbah, belum adanya data pelindian logam berat, serta perlunya replikasi yang memadai untuk pengujian statistik inferensial. Oleh karena itu, hasil penelitian sebaiknya dibaca sebagai dasar pemetaan potensi, bukan sebagai rekomendasi final untuk penerapan lapangan berskala luas.

### Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah pertambangan memiliki potensi sebagai bahan baku alternatif material konstruksi, tetapi tingkat kelayakannya berbeda antarjenis limbah. Dari tiga material yang diuji, slag menunjukkan performa paling kuat dan paling seimbang. Pada umur 28 hari, slag mencapai kuat tekan 42,1 MPa atau sekitar 93,6% dari kontrol, dengan daya serap air 3,7% dan evaluasi ketahanan degradasi kategori baik.

Fly ash mencapai kuat tekan 36,5 MPa pada umur 28 hari, tetapi memiliki daya serap air tertinggi, yaitu 6,8%. Hal ini menunjukkan bahwa fly ash memerlukan optimasi campuran, curing lebih panjang, atau aktivasi tambahan sebelum digunakan secara lebih luas. Tailing mencapai kuat tekan 34,0 MPa dan daya serap air 4,7%, sehingga berpotensi digunakan pada aplikasi tertentu, terutama sebagai bahan pengisi atau substitusi agregat, dengan syarat karakterisasi material dilakukan secara ketat.

Kontribusi utama penelitian ini adalah penyediaan peta kinerja komparatif antara tailing, slag, dan fly ash dalam satu kerangka pengujian yang sama. Kontribusi tersebut lebih spesifik daripada sekadar menyatakan bahwa limbah pertambangan dapat dimanfaatkan

sebagai material konstruksi. Temuan ini juga menegaskan bahwa klaim ramah lingkungan harus dibuktikan melalui dua aspek sekaligus: kinerja teknis dan keamanan lingkungan.

Penelitian lanjutan perlu diarahkan pada: (1) karakterisasi kimia dan mineralogi limbah; (2) variasi proporsi campuran yang lebih sistematis; (3) replikasi dan analisis statistik; (4) uji durabilitas jangka panjang, termasuk penetrasi klorida, serangan sulfat, siklus basah-kering, dan korosi tulangan; serta (5) uji pelindian dan analisis daur hidup untuk memastikan bahwa material yang dihasilkan benar-benar memenuhi prinsip konstruksi berkelanjutan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Pejuang Republik Indonesia, Makassar, atas dukungan akademik dan fasilitas selama pelaksanaan penelitian. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada pihak laboratorium yang membantu persiapan spesimen, pelaksanaan pengujian material, dan pengumpulan data. Apabila terdapat pihak penyedia limbah atau fasilitas pengujian eksternal, informasi tersebut perlu disebutkan secara spesifik pada naskah final.

### Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian, penyusunan, maupun publikasi artikel ini. Penelitian dilakukan secara independen tanpa pengaruh pihak mana pun yang dapat memengaruhi interpretasi hasil dan kesimpulan.

### Daftar Pustaka

- ASTM International. (2021). *ASTM C39/C39M-21: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- ASTM International. (2021). *ASTM C642-21: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2025). *ASTM G31-21(2025): Standard guide for laboratory immersion corrosion testing of metals*. ASTM International.
- Argane, R., Benzaazoua, M., Hakkou, R., & Bouamrane, A. (2015). Reuse of base-metal tailings as aggregates for rendering mortars: Assessment of mechanical and environmental properties. *Construction and Building Materials*, 96, 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.020>
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). *SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Badan Standardisasi Nasional.
- Bharadwaj, K., Weiss, W. J., & Isgor, O. B. (2023). Towards performance-based specifications for fly ash and natural pozzolans: Insights from a Monte Carlo-based thermodynamic modeling framework. *Cement and Concrete Research*, 172, 107230. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107230>
- Díaz-Piloneta, M., Terrados-Cristos, M., Álvarez-Cabal, J. V., & Vergara-González, E. (2021). Comprehensive analysis of steel slag as aggregate for road construction: Experimental testing and environmental impact assessment. *Materials*, 14(13), 3587. <https://doi.org/10.3390/ma14133587>
- Ding, Z., Zhang, J., Xue, J., & Chen, J. (2023). Strength development and environmental assessment of tailings-filling cementitious material with high-volume industrial by-product. *Metals*, 13(4), 777.
- El Machi, A., El Ouahabi, M., Brahim, I., & Talbi, M. (2024). Recycling of mine wastes in the concrete industry: A review. *Buildings*, 14(6), 1489. <https://doi.org/10.3390/buildings14061489>
- Ghazi, A. B., Jamshidi-Zanjani, A., & Nejati, H. (2022). Utilization of copper mine tailings as a partial substitute for cement in concrete construction. *Construction and Building Materials*, 319, 125921. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125921>

- International Council on Mining and Metals, United Nations Environment Programme, & Principles for Responsible Investment. (2020). *Global industry standard on tailings management*.
- Kumar, P., & Shukla, A. K. (2023). Utilization of steel slag waste as construction material. *Materials Today: Proceedings*, 78, 145–152.
- Lam, E. J., Zetola, V., Ramírez, Y., Montofré, Í. L., & Pereira, F. (2020). Making paving stones from copper mine tailings as aggregates. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7), 2448.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Oluwasola, E. A., Hainin, M. R., & Aziz, M. M. A. (2014). Potentials of steel slag and copper mine tailings as construction materials. *Materials Research Innovations*, 18(sup2), S2-212–S2-217. <https://doi.org/10.1179/1432891714Z.000000000966>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali-activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>
- Rachman, R. M., Bahri, A. S., & Trihadiningrum, Y. (2018). Stabilization and solidification of tailings from a traditional gold mine using Portland cement. *Environmental Engineering Research*, 23(2), 189–194.
- Ren, Z., & Li, D. (2023). Application of steel slag as an aggregate in concrete production: A review. *Materials*, 16(17), 5841. <https://doi.org/10.3390/ma16175841>
- International Organization for Standardization. (2006a). *ISO 14040:2006 environmental management—Life cycle assessment—principles and framework*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2006b). *ISO 14044:2006 environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines*. ISO.
- Thomas, M. (2013). *Supplementary cementing materials in concrete*. CRC Press.