

PEMANFAATAN *FLY ASH* DAN LIMBAH BAJA SEBAGAI BAHAN ALTERNATIF PANEL DINDING

Lilis Tiyani^{*1}, Sukarman², Nunung Martina³

Jurusan Teknik Sipil^{1,2,3}

Politeknik Negeri Jakarta^{1,2,3}

Jl. Prof. DR. G.A. Siwabessy, Kampus Universitas Indonesia, Depok, Indonesia, 16425

lilis.tiyani@sipil.pnj.ac.id¹, sukarman@sipil.pnj.ac.id², nunung.martina@sipil.pnj.ac.id³

Abstrak

Produksi semen portland dikenal menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan serta penggunaan energi dan sumber daya alam yang besar. Dalam kaitannya, material alternatif berbasis sisa industri menjadi sorotan penting dalam mewujudkan konstruksi yang lebih berkelanjutan. Salah satu rute yang menjanjikan adalah teknologi geopolimer, yaitu material pengikat berbasis aluminosilikat yang diaktivasi dengan larutan alkali (contoh: larutan NaOH, Na₂SiO₃). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan limbah baja terhadap sifat mekanik panel dinding berbasis *fly ash* sebagai upaya pengembangan material konstruksi ramah lingkungan. Bahan utama yang digunakan meliputi pasir, *fly ash*, larutan sodium silikat (Na₂SiO₃), larutan natrium hidroksida (NaOH), dan limbah baja. Proses pembuatan dilakukan melalui tahap persiapan aktivator, pencampuran bahan kering (pasir, *fly ash*, dan limbah baja), penambahan aktivator secara bertahap, pencetakan, serta perawatan lembap. Hasil pengujian menunjukkan bahwa panel dengan limbah baja memiliki kuat tekan sebesar 15,91 MPa, meningkat 22% dibanding panel tanpa limbah baja (13,04 MPa). Sementara itu, kuat lentur panel dengan limbah baja mencapai 4,93 MPa, meningkat 64% dibanding panel tanpa limbah baja (3,01 MPa). Peningkatan kekuatan ini disebabkan oleh fungsi partikel limbah baja sebagai mikro-reinforcement yang memperbaiki struktur mikro, meningkatkan densitas, serta menahan penyebaran retak. Dengan demikian, pemanfaatan limbah baja dalam komposisi panel dinding berbasis *fly ash* terbukti mampu meningkatkan performa mekanik sekaligus mendukung konsep material bangunan berkelanjutan.

Kata kunci :

limbah baja, geopolimer, kuat tekan, kuat lentur, panel dinding

Abstract

Portland cement production is known to generate significant CO₂ emissions and consume significant energy and natural resources. In this regard, alternative materials based on industrial waste are becoming a key focus for achieving more sustainable construction. One promising route is geopolymer technology, an aluminosilicate-based binder activated with an alkaline solution (e.g., NaOH, Na₂SiO₃). This study aims to evaluate the effect of steel waste addition on the mechanical properties of fly ash-based wall panels as part of developing environmentally friendly construction materials. The main materials used include sand, fly ash, sodium silicate (Na₂SiO₃) solution, sodium hydroxide (NaOH) solution, and steel waste. The manufacturing process involved preparing the activator, mixing dry materials (sand, fly ash, and steel waste), gradually adding the activator, molding, and curing under moist conditions. The test results showed that panels containing steel waste achieved a compressive strength of 15.91 MPa, an increase of 22% compared to panels without steel waste (13.04 MPa). The flexural strength of panels with steel waste reached 4.93 MPa, an increase of 64% compared to those without (3.01 MPa). The strength enhancement is attributed to the role of steel waste particles as micro-reinforcement, which improves the microstructure, increases density, and prevents crack propagation. Therefore, incorporating steel waste into fly ash-based wall panels effectively enhances

mechanical performance while supporting the development of sustainable building materials.

Keywords :

steel waste, geopolymer, compressive strength, flexural strength, wall panel.

I. PENDAHULUAN

Industri konstruksi global menghadapi tantangan ganda: kebutuhan yang terus meningkat terhadap material bangunan sekaligus upaya pengurangan dampak lingkungan dari produksi semen portland konvensional. Produksi semen portland dikenal menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan serta penggunaan energi dan sumber daya alam yang besar. Dalam kaitannya, material alternatif berbasis sisa industri menjadi sorotan penting dalam mewujudkan konstruksi yang lebih berkelanjutan (Luhar & Luhar, 2022).

Salah satu rute yang menjanjikan adalah teknologi geopolimer, yaitu material pengikat berbasis aluminosilikat yang diaktivasi dengan larutan alkali (contoh: larutan NaOH, Na₂SiO₃). Dalam proses ini, alumina dan silika dari precursor seperti abu terbang (*fly ash*) larut dalam larutan alkali dan kemudian membentuk jaringan tiga dimensi N–A–S–H (*sodium aluminosilicate hydrate*) atau C–A–S–H (jika kalsium hadir) yang menggantikan fungsi semen konvensional. *Fly ash* memiliki potensi karena kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ yang cukup tinggi dan tersedia sebagai limbah industri (Solse, 2019).

Pemanfaatan *fly ash* dalam geopolimer secara khusus telah banyak dikaji dalam literatur. Sebagai contoh, tinjauan komprehensif oleh Luhar & Luhar (2022) menunjukkan bahwa geopolimer berbasis *fly ash* menawarkan potensi tinggi sebagai material konstruksi yang tahan lama, efisien secara energi, dan ramah lingkungan. Namun, meskipun kuat tekan dan kelenturan material geopolimer telah banyak diteliti, aplikasi dalam bentuk panel dinding—khususnya dengan ukuran dan kondisi nyata konstruksi—masih relatif terbatas (Rathinavel et al., 2025).

Di sisi lain, limbah logam, seperti limbah baja industri, juga mulai dilirik sebagai bahan tambahan dalam material konstruksi. Penggunaan limbah baja tidak hanya sebagai agregat atau filler, tetapi juga sebagai *reinforcement* mikro (*micro-reinforcement*) untuk meningkatkan sifat mekanik material komposit,

termasuk geopolimer. Prinsipnya adalah partikel logam atau serat logam dapat menahan penyebaran retak (*crack propagation*) dan meningkatkan densitas serta keterikatan antar material. Guna memaksimalkan potensi ini, kombinasi antara *fly ash* sebagai *precursor* dan limbah baja sebagai bahan penguat dalam panel dinding geopolimer tampak sebagai alternatif yang menarik untuk dikaji lebih lanjut.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada pemanfaatan *fly ash* dan limbah baja sebagai bahan alternatif untuk panel dinding. Panel dinding dibuat dengan bahan dasar pasir, *fly ash*, larutan sodium silikat, larutan NaOH, dan limbah baja—dengan dua kondisi: (1) panel dengan tambahan limbah baja, dan (2) panel tanpa limbah baja. Metode pencampuran meliputi persiapan aktivator minimal 24 jam sebelumnya, pencampuran bahan kering, penambahan aktivator secara bertahap, dan perawatan lembap. Tujuan penelitian adalah untuk mengevaluasi pengaruh penambahan limbah baja terhadap sifat mekanik panel dinding berbasis *fly ash* (kuat tekan dan kuat lentur), serta menjelaskan mekanisme penguatan yang terjadi secara material. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi penting baik dari sisi pengembangan material konstruksi berkelanjutan maupun dari sisi pemanfaatan limbah industri (*fly ash* dan limbah baja) dalam bentuk panel dinding geopolimer. Lebih lanjut, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan bagi pengaplikasian panel dinding geopolimer skala industri dan mendorong arah pengembangan konstruksi hijau.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Uji Bahan Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta.

Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan bahan utama berupa *fly ash*, limbah baja, pasir halus, larutan sodium silikat (Na₂SiO₃), dan larutan natrium hidroksida (NaOH) sebagai aktivator alkali.

- *Fly ash* diperoleh dari limbah pembakaran batu bara dengan kandungan utama silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃) yang berfungsi sebagai bahan pengikat dalam sistem geopolimer.

- Limbah baja digunakan sebagai *micro-reinforcement* yang berfungsi meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan retak. Limbah ini berupa serbuk atau potongan kecil hasil sisa industri manufaktur baja yang telah dibersihkan dan dikeringkan sebelum digunakan.
- Pasir halus berfungsi sebagai agregat utama penyusun panel dinding.
- Larutan NaOH dan Na₂SiO₃ digunakan sebagai aktivator yang berperan memicu reaksi polimerisasi pada fly ash.

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa panel dinding ukuran 60 cm x 30 cm x 5 cm untuk pengujian kuat tekan dan kuat lentur pada umur 28 hari masing-masing sebanyak 3 sampel.

Tabel 1. Variasi Jumlah Benda Uji Panel Dinding

Variasi	Pengujian	Jumlah
Fly Ash dengan Limbah Baja	Kuat Tekan	3
	Kuat Lentur	3
Fly Ash tanpa Limbah Baja	Kuat Tekan	3
	Kuat Lentur	3

III. ANALISIS DAN PERANCANGAN

Data Pengujian Kuat Tekan

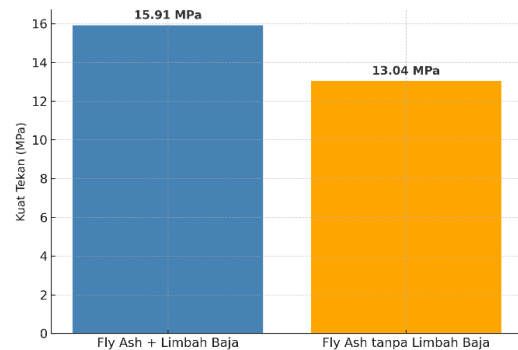
Data yang telah diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung kuat tekan panel dinding, sebagaimana ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 2. Data Pengujian Kuat Tekan Panel Dinding Fly Ash dengan Limbah Baja

Panel Dinding Fly Ash dengan Limbah Baja		
Sampel	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	15,57	
2	16,38	15,91
3	15,77	

Tabel 3. Data Pengujian Kuat Tekan Panel Dinding Fly Ash tanpa Limbah Baja

Panel Dinding Fly Ash tanpa Limbah Baja		
Sampel	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	12,77	
2	13,43	13,04
3	12,92	



Gambar 1. Grafik Perbandingan Kuat Tekan Panel Dinding Fly Ash Umur 28 Hari



Gambar 2. Pengujian Kuat Tekan Panel Dinding

Pengujian kuat tekan dilakukan pada dua jenis panel dinding, yaitu panel dinding *fly ash* dengan tambahan limbah baja dan panel dinding *fly ash* tanpa limbah baja.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa:

- Panel dengan limbah baja memiliki kuat tekan sebesar 15,91 MPa,
- Sedangkan panel tanpa limbah baja memiliki kuat tekan sebesar 13,04 MPa.

Terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 2,87 MPa atau sekitar 22% lebih tinggi pada panel yang mengandung limbah baja. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan limbah baja sebagai bahan tambahan mampu meningkatkan daya tahan panel terhadap beban tekan. Secara material, partikel baja berfungsi memperkuat struktur mikro beton geopolimer berbasis *fly ash*, meningkatkan kekompakan (densitas), serta mengurangi retak awal yang terjadi akibat beban tekan.

Data Pengujian Kuat Lentur

Data yang telah diperoleh selanjutnya digunakan untuk menghitung kuat lentur panel dinding *fly ash* dengan limbah baja dan tanpa limbah baja, sebagaimana ditampilkan pada tabel 4.

Pengujian kuat lentur dilakukan pada dua jenis panel dinding, yaitu panel dinding *fly ash* dengan tambahan limbah baja dan panel dinding *fly ash* tanpa limbah baja.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa:

- Panel dengan limbah baja memiliki kuat lentur sebesar 4,93 MPa,
- Panel tanpa limbah baja memiliki kuat lentur sebesar 3,01 MPa.

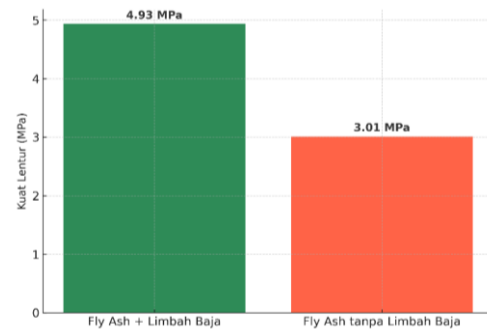
Perbedaan hasil ini menunjukkan adanya peningkatan kuat lentur sebesar 1,92 MPa atau sekitar 64% lebih tinggi pada panel yang mengandung limbah baja. Peningkatan tersebut disebabkan oleh efek penguatan dari partikel baja yang berfungsi sebagai *mikro-reinforcement*, sehingga mampu meningkatkan daya tahan material terhadap tegangan tarik akibat lentur. Limbah baja membantu menahan penyebaran retak.

Tabel 4. Data Pengujian Kuat Lentur Panel Dinding *Fly Ash* dengan Limbah Baja

Panel Dinding <i>Fly Ash</i> dengan Limbah Baja		
Sampel	Kuat Lentur (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	4,95	
2	5,05	4,93
3	4,79	

Tabel 5. Data Pengujian Kuat Lentur Panel Dinding *Fly Ash* tanpa Limbah Baja

Panel Dinding <i>Fly Ash</i> dengan Limbah Baja		
Sampel	Kuat Lentur (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	3,04	
2	3,22	3,01
3	2,78	



Gambar 3. Grafik Perbandingan Kuat Lentur Panel Dinding *Fly Ash* Umur 28 Hari



Gambar 4. Pengujian Kuat Lentur Panel Dinding

Pembahasan

Hasil pengujian kuat tekan dan kuat lentur menunjukkan bahwa penambahan limbah baja pada panel dinding berbasis *fly ash* memberikan peningkatan terhadap sifat mekanik material. Pada pengujian kuat tekan, panel dinding *fly ash* dengan tambahan limbah baja menunjukkan nilai kuat tekan sebesar 15,91 MPa, sedangkan panel tanpa limbah baja hanya mencapai 13,04 MPa. Terjadi peningkatan sebesar 2,87 MPa atau sekitar 22%. Peningkatan ini

menunjukkan bahwa partikel baja berperan sebagai penguat struktural yang memperkuat ikatan antar partikel dalam matriks *fly ash* sehingga mampu meningkatkan kapasitas tahanan terhadap gaya tekan.

Sementara itu, pada pengujian kuat lentur diperoleh nilai kuat lentur sebesar 4,93 MPa untuk panel dinding *fly ash* dengan limbah baja dan 3,01 MPa untuk panel tanpa limbah baja. Hasil ini menunjukkan adanya peningkatan sebesar 1,92 MPa atau sekitar 64% pada material dengan tambahan limbah baja. Peningkatan ini menunjukkan bahwa limbah baja berfungsi sebagai *mikro-reinforcement* yang membantu material dalam menahan gaya tarik akibat pembebanan lentur. Partikel baja meningkatkan kekompakan struktur, memperbaiki ikatan antar partikel, serta menahan perambatan retak mikro pada saat pembebanan.

Secara umum, penambahan limbah baja pada panel dinding *fly ash* tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanik, tetapi juga berpotensi memperbaiki sifat keawetan material. Limbah baja yang digunakan mampu menambah densitas material dan menurunkan porositas, sehingga dapat meningkatkan daya tahan terhadap beban dan potensi kerusakan. Selain itu, pemanfaatan limbah baja mendukung konsep material ramah lingkungan dengan mengoptimalkan penggunaan bahan sisa industri menjadi komponen konstruksi yang bermanfaat.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penambahan limbah baja pada campuran panel dinding berbasis *fly ash* mampu meningkatkan performa mekanik material secara signifikan. Nilai kuat tekan panel meningkat dari 13,04 MPa menjadi 15,91 MPa atau sekitar 22%, sedangkan kuat lenturnya meningkat dari 3,01 MPa menjadi 4,93 MPa atau sekitar 64%. Peningkatan ini disebabkan oleh peran partikel limbah baja sebagai penguat mikro (*mikro-reinforcement*) yang memperbaiki ikatan antar partikel, meningkatkan kekompakan struktur, serta menghambat propagasi retak pada matriks geopolimer. Dengan demikian, pemanfaatan limbah baja dalam panel dinding berbasis *fly ash* tidak hanya meningkatkan kekuatan mekanik, tetapi juga mendukung penerapan prinsip konstruksi

berkelanjutan melalui pengurangan limbah industri dan penggunaan material ramah lingkungan.

REFERENSI

- Ashad, H., Supardi, S., Mappiasse, A., Zhahir, A. M. I., & Surya, D. P. (2021). Pemanfaatan limbah pembakaran batu bara sebagai bahan substitusi parsial semen. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 1(1).
- ASTM C469. (n.d.). *Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression*. ASTM International.
- ASTM E72-05. (n.d.). *Standard test method of conducting strength tests of panels for building construction*. ASTM International.
- ASTM E756. (n.d.). *Standard test method for measuring vibration-damping properties of materials*. ASTM International.
- Ayuningtyas, U., et al. (2023). Pemanfaatan fly ash dan bottom ash sebagai material konstruksi ramah lingkungan dalam rangka mendukung kriteria bangunan hijau. *Proceedings of National Colloquium Research and Community Service*, 6.
- Firda, A., Permatasari, R., & Fuad, I. S. (2021). Pemanfaatan limbah batubara (fly ash) sebagai material pengganti agregat kasar pada pembuatan beton ringan. *Jurnal Deformasi*, 6(1).
- George, K., & Revathi, P. (2020). Production and utilisation of artificial coarse aggregate in concrete – A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 912.
- Karmadi, K. A., & Widyasari, N. L. (2024). Pemanfaatan fly ash sebagai pengganti sebagian semen Portland untuk mengurangi emisi karbon. *Jurnal Ecocentrism*, 4(2).
- Luhar, S., & Luhar, I. (2022). A comprehensive review on fly ash-based geopolymer. *Journal of Building Engineering*, 54, 104655.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Ramesh, R. B. M., et al. (2021). Valorization of incinerator bottom ash for the production of resource-efficient eco-friendly concrete: Performance and toxicological characterization. *arXiv preprint*, arXiv:2104.12497.
- Rathinavel, S., Balamurugan, P., & Saravanan, T.

- (2025). Experimental study on geopolymer concrete wall panels reinforced with industrial by-products. *Scientific Reports*, 15(1), 11783.
- Shiddique, R. (2010). Utilization of industrial by-products in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), 1060–1067.
- Shi, C., Jiménez, A. F., & Palomo, A. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 750–763.
- Sholekah, A. R. N. (2022). Pemanfaatan aluminium slag dan fly ash sebagai bahan substitusi semen pada campuran pembuatan beton ringan seluler. *Rekayasa Teknik Sipil*, 10(3).
- Solse, N. (2019). Geopolymeric building material by using fly ash in construction. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 8(12), 1–5.
- SNI 03-3122-1992. (1992). Panel beton ringan berserat. Badan Standardisasi Nasional (BSN).