

Pemanfaatan Limbah Serbuk Kaca dan Keramik *Sanitary* pada Pasta Geopolymer Berbahan Dasar *Fly Ash*

MAULIDAH NUR RIZKA¹, ALTIE SANTIKA ARIFIN^{1*}

¹Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Indonesia
Email: 25023022@mahasiswa.itb.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan beton berdampak pada kenaikan emisi CO₂ akibat produksi semen, sehingga diperlukan material pengikat alternatif yang ramah lingkungan. Penelitian ini mengkaji pemanfaatan limbah serbuk kaca dan keramik saniter sebagai substitusi fly ash pada pasta geopolimer berbasis aktivator alkali. Metode penelitian menggunakan benda uji kubus 5×5×5 cm dengan variasi substitusi fly ash 0%, 25%, 50%, dan 75%. Aktivator alkali yang digunakan adalah larutan NaOH 10M dan Na₂SiO₃ dengan rasio 1:3. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi serbuk kaca menurunkan kuat tekan hingga 50% dibanding kontrol (100% fly ash), sedangkan substitusi keramik saniter 50% menghasilkan kuat tekan 35,77 MPa, mendekati kuat tekan kontrol 40,82 MPa. Dengan demikian, keramik saniter dengan kadar substitusi 50% direkomendasikan sebagai pengganti fly ash yang paling optimal.

Kata kunci: geopolimer, fly ash, serbuk kaca, keramik saniter, kuat tekan

ABSTRACT

The increase in demand for concrete has led to an increase in CO₂ emissions from cement production, necessitating the use of environmentally friendly alternative binding materials. This study examines the use of glass powder and sanitary ceramic waste as substitutes for fly ash in alkali-activated geopolymer paste. The research method used 5×5×5 cm cube test specimens with variations in fly ash substitution of 0%, 25%, 50%, and 75%. The alkali activators used were 10M NaOH and Na₂SiO₃ solutions with a ratio of 1:3. Compressive strength testing was carried out at 28 days. The results showed that glass powder substitution reduced compressive strength by up to 50% compared to the control (100% fly ash), while 50% sanitary ceramic substitution produced a compressive strength of 35.77 MPa, close to the control compressive strength of 40.82 MPa. Thus, sanitary ceramics with a substitution rate of 50% are recommended as the most optimal substitute for fly ash.

Keywords: geopolymer, fly ash, glass powder, sanitary ceramics, compressive strength

1. PENDAHULUAN

Peningkatan pembangunan infrastruktur di Indonesia, seperti jalan, jembatan, dan fasilitas umum, memicu permintaan beton yang semakin tinggi. Hal ini berbanding lurus dengan kenaikan konsumsi semen yang berdampak pada peningkatan emisi gas rumah kaca. Produksi semen menyumbang sekitar 36% emisi yang terkait dengan kegiatan konstruksi dan 8% dari total emisi karbon dioksida global [1]. Kondisi ini mendorong pencarian material alternatif yang lebih ramah lingkungan untuk mengurangi ketergantungan pada semen Portland. Salah satu inovasi yang berkembang adalah beton geopolimer, yang menggunakan material kaya silika dan alumina seperti *fly ash* sebagai pengikat melalui proses polimerisasi, sehingga dapat mengurangi emisi karbon. Geopolimer adalah istilah untuk menggambarkan reaksi kimia yang terjadi antara cairan alkali dengan silikon (Si) dan aluminium (Al) yang terdapat dalam sumber yang berasal dari *geological origin* atau bahan sisa seperti *fly ash* dan abu sekam padi [2].

Namun, ketersediaan *fly ash* dengan kualitas tinggi semakin terbatas sehingga diperlukan upaya mencari material pengganti. Kaca dan keramik saniter merupakan limbah padat yang melimpah dan menimbulkan masalah lingkungan serius akibat penumpukan di tempat pembuangan akhir [3]. Pemanfaatan material-material ini sebagai bahan baku alternatif dalam produksi geopolimer menawarkan solusi inovatif untuk mengurangi dampak lingkungan sekaligus menciptakan material konstruksi berkelanjutan dengan kinerja yang sebanding atau bahkan lebih unggul dari bahan berbasis semen Portland tradisional [4,5]. Geopolimer sendiri merupakan polimer anorganik yang tersusun atas unit AlO_4 dan SiO_4 , yang berpolimerisasi dari prekursor seperti *fly ash*, menawarkan manfaat lingkungan yang substansial, termasuk pengurangan emisi CO_2 dan kebutuhan energi yang lebih rendah dibandingkan dengan Portland Cement [6,7]. Proses sintesis geopolimer umumnya melibatkan aktivasi alkali bahan-bahan yang kaya akan aluminosilikat, seperti *fly ash*, yang merupakan produk sampingan dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik termal [8]. Penggunaan *fly ash* dalam produksi geopolimer tidak hanya mengurangi volume limbah industri tetapi juga menghasilkan material yang ramah lingkungan dengan emisi CO_2 hingga 80% lebih rendah dibandingkan semen Portland [9,10]. Pemanfaatan limbah kaca dan keramik saniter dalam formulasi geopolimer dapat mengoptimalkan sifat mekanik dan durabilitas produk akhir [11]. Limbah serbuk kaca dan keramik saniter merupakan material yang berpotensi menjadi substitusi karena memiliki kandungan silika dan alumina yang tinggi. Pemanfaatan limbah ini juga mendukung upaya pengelolaan sampah industri yang sulit didaur ulang secara mandiri. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh substitusi serbuk kaca dan keramik saniter terhadap kuat tekan pasta geopolimer, sehingga dapat diperoleh komposisi optimum yang tetap memenuhi kebutuhan kekuatan sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan.

2. METODOLOGI

Penelitian menggunakan metode eksperimental di Laboratorium Rekayasa Struktur ITB. Penelitian ini Bahan utama adalah *fly ash* kelas F berdasarkan ASTM C618 [12] dan SNI 2460-2014 [13] dari PLTU Paiton, serbuk kaca limbah industri, keramik saniter limbah pabrik, serta larutan alkali (NaOH 10M dan Na_2SiO_3 dengan rasio 1:3). Benda uji berbentuk kubus berukuran $5 \times 5 \times 5$ cm dibuat dalam 7 variasi yang dapat dilihat pada **Tabel 1**. Total benda uji sebanyak 21 sampel. Penelitian ini dimulai dengan studi literatur dilanjutkan dengan persiapan alat dan benda uji. Material dan peralatan yang di uji pada penelitian ini adalah *fly ash*, limbah keramik sanitasi, limbah serbuk kaca dan alkali aktivator. Dilakukan pengujian dan studi literatur terkait berat jenis, dan sifat mekanis pada material *fly ash*, limbah keramik sanitasi dan serbuk kaca. Selanjutnya pembuatan *mix design* untuk masing masing substitusi material keramik sanitasi dan serbuk kaca 0%, 25%, 50%, 75%. Setelah perhitungan *mix design* dilakukan pembuatan benda uji dengan masing masing 3 benda uji untuk setiap campuran.

Curing atau perawatan beton geopolimer ini dilakukan dengan metode membran, setelah 21 hari dilakukan uji tekan untuk mendapatkan hasil kuat tekan dari masing masing campuran.

Tabel 1. Variasi dan Jumlah Benda Uji

Variasi Campuran	Jumlah Benda Uji
100% <i>Fly Ash</i>	3 Benda Uji
75% <i>Fly Ash</i> + 25% Serbuk Keramik	3 Benda Uji
50% <i>Fly Ash</i> + 50% Serbuk Keramik	3 Benda Uji
25% <i>Fly Ash</i> + 75% Serbuk Keramik	3 Benda Uji
75% <i>Fly Ash</i> + 25% Serbuk Kaca	3 Benda Uji
50% <i>Fly Ash</i> + 50% Serbuk Kaca	3 Benda Uji
25% <i>Fly Ash</i> + 75% Serbuk Kaca	3 Benda Uji
Total	21 Benda Uji

Perancangan Campuran Geopolimer

Panduan *mix design* mengenai beton *geopolymer* level *cementitious* saat ini belum tersedia, maka perancangan campuran dibuat dengan mengadopsi pendekatan massa material berdasarkan literatur. *Mix design* dapat dilihat pada **Tabel 2**

Tabel 2. Perancangan *Mix Design*

No	Kode Benda Uji	Bahan				
		Fly Ash [kg]	NaOH [kg]	Na ₂ SiO ₃ [kg]	Keramik [kg]	Serbuk Kaca [kg]
1	100% FA	0,825	0,0825	0,274	-	-
2	25% KA 75% FA	0,61875	0,0825	0,274	0,20625	-
3	50% KA 50% FA	0,4125	0,0825	0,274	0,4125	-
4	75% KA 25% FA	0,20625	0,0825	0,274	0,61875	-
5	25% SK 75% FA	0,61875	0,0825	0,274	-	0,20625
6	50% SK 50% FA	0,4125	0,0825	0,274	-	0,4125
7	75% SK 25% FA	0,20625	0,0825	0,274	-	0,61875

Metode *Curing Membrane*

Metode perawatan benda uji yang digunakan adalah metode *membrane*, dimana benda uji dimasukkan ke dalam *plastic membrane* untuk menjaga suhu *geopolymer* agar tidak terlalu tinggi saat mengeras dan mencegah kehilangan air dari mortar.

Pengujian Kuat Tekan

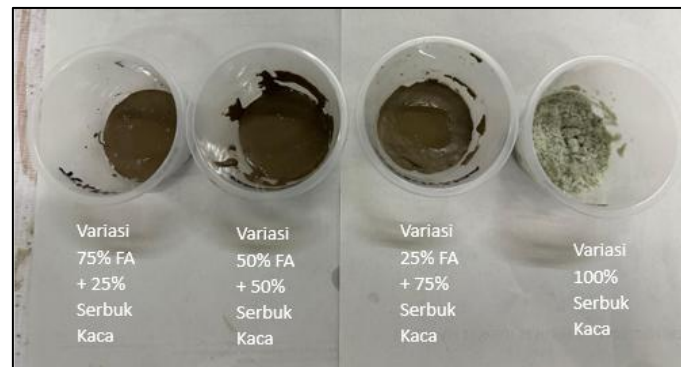
Pengujian kuat tekan dilakukan dengan *Compression Testing Machine* untuk mengetahui nilai kuat tekan sampai dengan kondisi runtuh. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari dan berdasarkan SNI 03-1974-2011 [14].

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

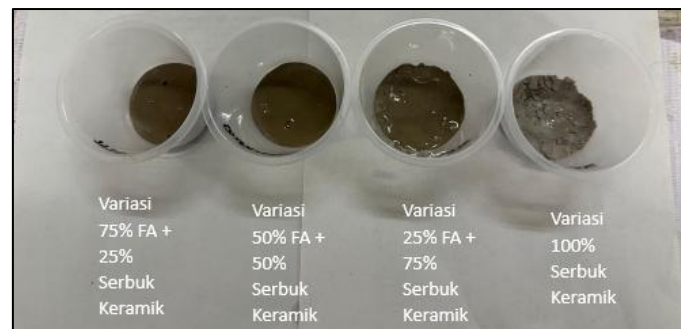
Hasil pengujian penelitian terdiri dari hasil uji trial mix sampai hasil beton pada umur 28 hari.

3.1 Hasil Uji *Trial Mix*

Pada saat *trial mix* untuk memastikan apakah bahan yang dipakai dapat bereaksi dengan baik pada saat pembuatan benda uji. Pengujian ini dilakukan dengan mencampur bahan-bahan dengan skala kecil dimana pada skala 10 gr *fly ash* (FA). Adapun hasil yang didapat yang dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**. Dilihat dari hasil pengujian *workability* bahwa semakin banyak penggantian *fly ash* dengan serbuk kaca maupun keramik, *workability*-nya semakin menurun sampai penggantian 100% yang tidak reaktif dengan *alkaline activator* untuk membentuk reaksi polimerisasi atau geopolimer. Penambahan limbah kaca dalam campuran geopolimer mengurangi *workability* dan memperlambat reaksi awal [15] dan juga menunjukkan bahwa substitusi keramik dan kaca pada *fly ash* cenderung menunda reaksi polimerisasi dan menurunkan kemudahan pengerjaan [16].



Gambar 1. Hasil pengujian *workability* pada variasi campuran serbuk kaca



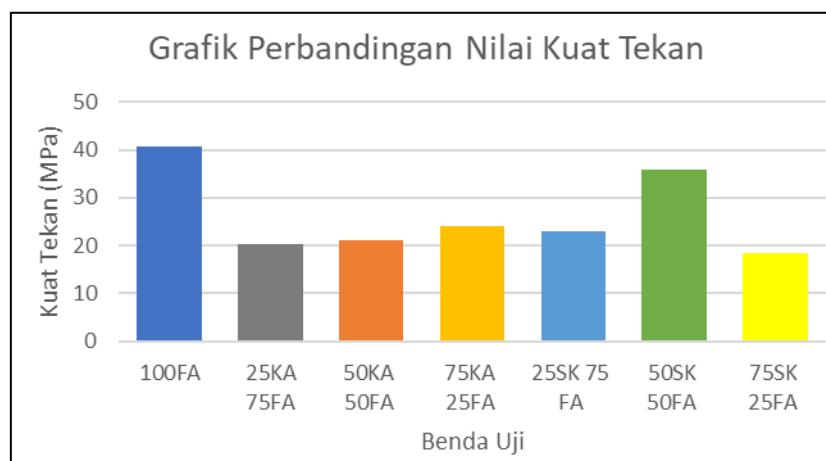
Gambar 2. Hasil pengujian *workability* pada variasi campuran serbuk keramik

3.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan

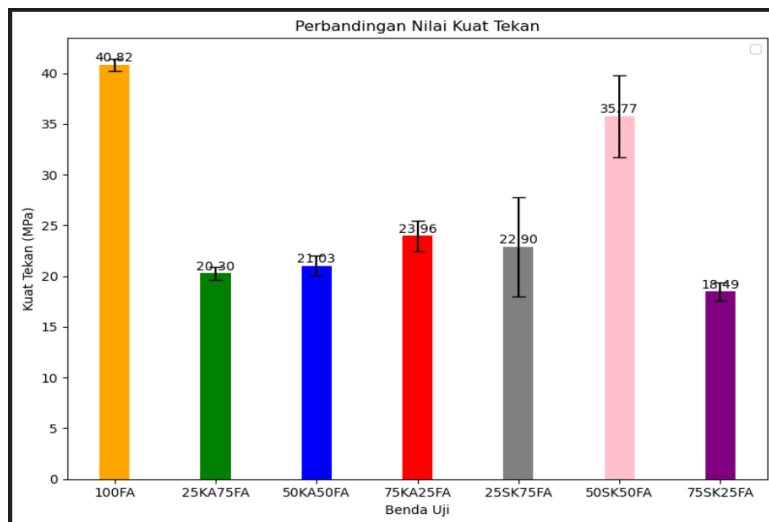
Pada penelitian ini, dilakukan pengujian kuat tekan geopolimer pada umur 28 hari dengan menggunakan satuan pengukuran MPa dapat dilihat pada **Tabel 2** dan grafik rata-rata dan standar deviasi kuat tekan ditampilkan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**. Dari hasil pengujian kuat tekan yang telah dilakukan bahwa kontrol yang digunakan adalah campuran dengan 100% *fly ash*. Campuran ini memiliki nilai kuat tekan yang cukup tinggi yaitu 40,823 MPa. Nilai kuat tekan yang mendekati nilai kuat tekan kontrol adalah campuran *geopolymer* yang di substitusi adalah campuran dengan menggunakan bahan pengganti keramik saniter pada persentase pengganti 50% *fly ash*. Setelah *resume* nilai kuat tekan beton ditentukan dilakukan perhitungan standar deviasi untuk mengetahui variabilitas kuat tekan beton, semakin kecil nilai standar deviasi menunjukkan adanya variasi yang kecil dalam campuran beton.

Tabel 2. Hasil Uji Kuat Tekan Benda Uji

No.	Identifikasi Benda Uji	Kuat Tekan [MPa]	Rata -Rata	Strandar Deviasi
1	100% FA (1)	40,3799		
2	100% FA (2)	40,6313	40,8225	0,563105
3	100% FA (3)	41,4563		
4	25% KA 75% FA (1)	20,7432		
5	25% KA 75% FA (2)	19,8485	17,5878	4,711711
6	25% KA 75% FA (3)	12,1718		
7	50% KA 50% FA (1)	19,9573		
8	50% KA 50% FA (2)	21,9471	21,0306	1,004104
9	50% KA 50% FA (3)	21,1872		
10	75% KA 25% FA (1)	15,6899		
11	75% KA 25% FA (2)	22,8994	21,2067	4,895002
12	75% KA 25% FA (3)	25,0306		
13	25% SK 75% FA (1)	26,3721		
14	25% SK 75% FA (2)	19,4250	17,8418	9,422124
15	25% SK 75% FA (3)	7,7284		
16	50% SK 50% FA (1)	49,3565		
17	50% SK 50% FA (2)	38,6022	40,2979	8,34103
18	50% SK 50% FA (3)	32,9350		
19	75% SK 25% FA (1)	19,1204		
20	75% SK 25% FA (2)	17,8616	15,5602	5,115167
21	75% SK 25% FA (3)	9,6986		



Gambar 3. Resume kuat tekan campuran geopolimer



Gambar 4. Standar deviasi pada setiap campuran *geopolymer*

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil pengujian di atas dan pembahasan pada bab sebelumnya maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pengaruh substitusi kaca sebagai *binder fly ash* memberikan hasil yang cukup baik namun mengurangi kuat tekan kurang lebih 50%. Kuat tekan maksimum yang dihasilkan dari substitusi kaca adalah 23,965 MPa dengan persentase 75% serbuk kaca dan 25% *fly ash*.
2. Pengaruh substitusi keramik *sanitary* sebagai *binder fly ash* memberikan hasil yang baik dengan nilai kuat tekan yang hampir sama dengan 100% *fly ash*. Kuat tekan maksimum yang dihasilkan dari substitusi keramik saniter adalah 35,769 MPa dengan persentase 50% keramik *sanitary* dan 50% *fly ash*.
3. Substitusi keramik *sanitary* mengalami penurunan kuat tekan yang signifikan pada substitusi lebih dari 50%.
4. Substitusi kaca masih mengalami kenaikan kuat tekan pada persentase substitusi 75% namun nilai kuat tekan tidak naik signifikan dan masih berkisar di 50% kuat tekan dari campuran 100% *fly ash*.

Adapun saran yang dapat diberikan dan dilakukan selanjutnya, yaitu sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian mengenai substitusi parsial serbuk kaca maupun keramik *sanitary* dalam rentang yang lebih kecil sebesar dengan perubahan sebesar 5-10%
2. Material yang lebih baik digunakan sebagai pengganti *fly ash* yang direkomendasikan berdasarkan penelitian ini adalah keramik *sanitary* dengan substitusi tidak lebih dari 50%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. Habert, "Environmental Impacts of Cement Production: Key Figures and Drivers," *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, vol. 9, no. 4, pp. 175–190, 2020.
- [2] J. Davidovits, "Properties of Geopolymer Cements," in *Proc. 1st Int. Conf. Alkaline Cements and Concretes*, 1994, pp. 131–149
- [3] S. Qaidi et al., "Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis," *Materials*, vol. 15, no. 20, p. 7098, Oct. 12, 2022
- [4] J. Payá, L. Soriano, A. Font, M. V. Borrachero, J. A. Nande, and J. Monzó, "Reuse of Industrial and Agricultural Waste in the Fabrication of Geopolymeric Binders: Mechanical and Microstructural Behavior," *Materials*, vol. 14, no. 9, p. 2089, Apr. 2021

- [5] C. Ziejewska, A. Grela, D. Mierzwiński, and M. Hebda, "Influence of Waste Glass Addition on the Fire Resistance, Microstructure and Mechanical Properties of Geopolymer Composites," *Materials*, vol. 16, no. 17, p. 6011, Sep. 2023
- [6] A. K. F. Gaddafi, "Impact of Ground Granular Blast Slag Proportioning in Fly Ash Geopolymer Mortars with Eco-Processed Pozzolana and Palm Oil Clinker Sand," *Discover Materials*, vol. 5, no. 1, Mar. 2025
- [7] G. L. Scalia, M. Saeli, L. Adelfio, and R. Micale, "From Lab to Industry: Scaling Up Green Geopolymeric Mortars Manufacturing Towards Circular Economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 316, p. 128164, Jul. 2021
- [8] Ş. Kocyiğit, "Performance Evaluation of Geopolymer Mortars Containing Waste Ferrochrome Slag and Fly Ash for Sustainable Green Building," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, Jun. 2024
- [9] S. Tomé, M. Etoh, J. Étamé, and S. Kumar, "Characterization and Leachability Behaviour of Geopolymer Cement Synthesised from Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash and Volcanic Ash Blends," *Recycling*, vol. 3, no. 4, p. 50, Nov. 2018
- [10] S. Al-Kasassbeh, J. Al-Thawabteh, E. Al-Kharabsheh, and A. Al-Tamseh, "Influential and Intellectual Structure of Geopolymer Concrete: A Bibliometric Review," *Civil Engineering Journal*, vol. 9, no. 9, p. 2330, Sep. 01, 2023
- [11] W. Wongpattanawut and B. I. N. Auydhya, "Effect of Curing Temperature on Mechanical Properties of Sanitary Ware Porcelain Based Geopolymer Mortar," *Civil Engineering and Architecture*, vol. 9, no. 3, pp. 905–912, May 2021
- [12] ASTM C618-12a. (2017). Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM International, Pennsylvania, United States. doi:10.1520/C0618-12.
- [13] Badan Standardisasi Nasional (BSN). SNI 2460:2014 – Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan Pozolan Alam Mentah atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan dalam Beton. Jakarta: BSN, 2014
- [14] Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 03-1974-2011: Cara Uji Kuat Tekan Beton. BSN, Jakarta
- [15] K. Cendrowski, E. Horszczaruk, and J. Strzałkowski, "Physico-Mechanical Properties of Geopolymers Based on Fly Ashes and Waste Broken Glass," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 13, p. 7495, 2025
- [16] M. Pourabbas Bilondi, V. Ghaffarian, M. Amiri Daluee, R. Pakizehrooh, S. Hosseini Tazik, and M. Zaresefat, "Experimental Studies on Mix Design and Properties of Ceramic-Glass Geopolymer Mortars Using Response Surface Methodology," *Scientific Reports*, vol. 15, art. 282, 2025