

## KARAKTERISTIK MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH KELAS C DENGAN PENAMBAHAN BORAKS

A. Bambang Yuuwono<sup>1</sup>, \*Kukuh Kurniawan Dwi Sungkono<sup>2</sup>, Haniadi Abdillah Rahman<sup>3</sup>, Aviv Rachmawan Heryan<sup>3</sup>, Rizal Kurniawan<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Prodi Arsitektur, Fakultas Teknik. Universitas Tunas Pembangunan. Surakarta

<sup>2</sup>Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik. Universitas Tunas Pembangunan. Surakarta

<sup>3</sup>Mahasiswa, Fakultas Teknik. Universitas Tunas Pembangunan. Surakarta

\*) Email: kukuh.kurniawan@lecture.utp.ac.id

### ABSTRACT

*Cement has been widely utilized as a primary material in the construction of structural and architectural elements. The cement factory industry can contribute to 30% of global carbon dioxide emissions. Geopolymers were first introduced by Davidovits in 1979 to represent inorganic polymers produced from geochemistry. Geopolymer materials make use of waste materials such as fly ash as a substitute for concrete binders. In this study, Class C (high calcium) fly ash from the Paiton Power Plant was used. The mix design for geopolymer mortar in this study employed the absolute volume calculation method. Absolute volume calculations are based on the absolute volume proportions of each constituent material within 1 m<sup>3</sup>. The compressive strength of geopolymer mortar with the addition of 5% borax to the molarity value, the alkali/cementitious ratio showed good performance in the mechanical properties of geopolymer mortar. Alkali/cementitious ratios of 0.3, 0.35, and 0.4 in Class C-based geopolymer mortar with 5% borax addition exhibited good workability, making it suitable for use as a base material in architectural material production.*

**Keyword:** fly ash, mortar, geopolymer, borax

### ABSTRAK

Semen telah banyak dimanfaatkan sebagai bahan utama konstruksi pada elemen struktur dan arsitektural. Industri pabrik semen dapat menghasilkan 30% karbon dioksida di seluruh dunia. Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits di 1979 untuk mewakili polimer anorganik yang dihasilkan dari geokimia. Material geopolimer memanfaatkan limbah seperti fly ash sebagai pengganti pengikat beton. Fly ash pada penelitian ini digunakan Kelas C (high calcium) yang berasal dari PLTU Paiton. Mix desain mortar geopolimer pada penelitian ini digunakan metode perhitungan volume absolut. Perhitungan volume absolut didasarkan pada proporsi volume absolut dari masing-masing material penyusun dalam 1 m<sup>3</sup>. Kuat tekan mortar geopolimer dengan penambahan borax 5% terhadap nilai molaritas, rasio alkali/cementitious menunjukkan kinerja yang baik pada sifat mekanik mortar geopolimer. Rasio alkali/cementitious sebesar 0.3, 0.35 dan 0.4 pada mortar geopolimer berbasis kelas C dengan penambahan borax 5% menunjukkan workability yang baik, sehingga dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuatan material arsitektural.

**Kata kunci:** fly ash, mortar, geopolimer, boraks

## 1. PENDAHULUAN

Material semen banyak digunakan sebagai bahan utama konstruksi dalam pembuatan beton, baik sebagai elemen struktur maupun arsitektural. Dari industri semen sebagai pembuat bahan utama beton dapat menghasilkan 30% karbon dioksida di seluruh dunia. Emisi CO<sub>2</sub> menimbulkan dampak buruk terhadap lingkungan, yang diakibatkan oleh penggilingan mineral, pembakaran fosil, dan bahan mentah di ruang Kiln [1]. Emisi ini sangat mempengaruhi kondisi lingkungan dan menimbulkan pemanasan global. Namun, pemanfaatan semen meningkat dalam industri konstruksi bangunan di seluruh dunia. Oleh karena itu, penggantian semen Portland sebagai bahan pengikat dengan bahan yang lebih ramah lingkungan dan lebih kecil energi dalam produksinya menjadi sangat mendesak.

Geopolimer pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits di 1979 untuk mewakili polimer anorganik yang dihasilkan dari geokimia. Geopolimer seperti polimer lainnya adalah makromolekul dengan ukuran dan berat molekul tertentu [2]. Geopolimer berbasis silika aluminat membutuhkan material yang memiliki silika dan alumina yang tinggi, seperti abu terbang (*fly ash*), terak, metakaolin dan lain-lain. Berdasarkan komposisi kimia, fly ash umumnya mengandung unsur-unsur oksida utama seperti SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO. Pada proses geopolimerisasi beton geopolimer berbasis *fly ash*. Reaksi antara fly ash (sumber aluminosilikat) dan larutan alkali (polisisilikat alkali) menghasilkan pembentukan nanopartikel geopolimer dengan struktur polimer tiga dimensi yang kuat [3].

Fly ash diklasifikasikan menjadi dua kelas yaitu kelas F dan kelas C [4]. Fly ash kelas F memiliki persyaratan kimia yaitu total prosentase berat minimal dari SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 70 % dan kelas C memiliki total prosentase berat minimal dari SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 50 %. CSA A3001 mengklasifikasikan fly ash menjadi tiga kelas, yaitu F untuk kandungan kalsium oksida tidak melebihi 8%, C untuk kandungan kalsium antara 8 – 20%, dan CH atau kandungan kalsium melebihi 20% dari fly ash. Kandungan kalsium yang tinggi pada precursor, memicu reaksi kimia yang menghasilkan gel Kalsium Silikat Hidrat (CSH), gel Kalsium Aluminium Silikat Hidrat (CASH), dan gel Natrium Aluminosilikat Hidrat (NASH) [5], [6]. Kalsium Silikat Hidrat dan Kalsium Aluminium Silikat Hidrat adalah produk yang serupa yang dihasilkan pada

proses hidrasi semen Portland. sedangkan Natrium Aluminosilikat Hidrat merupakan produk gel geopolimer. Pembentukan CSH dan CASH mampu meningkatkan kekuatan awal beton geopolimer yang diawetkan pada temperature ruangan. tetapi tingginya kandungan kalsium dapat mempercepat waktu pengerasan dan kemampuan kerja [7], [8]. Untuk memperlambat waktu pengerasan dan peningkatan kemampuan kerja beton geopolimer. beberapa penelitian menyarankan penambahan bahan adiktif. Namun penambahan bahan adiktif pada beton geopolimer memberikan dampak penurunan sifat mekanik beton geopolimer [9], [10]. Boraks ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ) merupakan bahan yang sangat efisien untuk memperlambat pengerasan plester [11]. Boraks secara fisik teradsorpsi pada permukaan kristal, sehingga mengurangi laju larutan hemihidrat dan pembentukan inti gipsum. Penambahan boraks pada beton geopolimer telah dipejari beberapa peneliti untuk mengetahui dampaknya. Penambahan boraks dengan prosentase 5% menunjukkan bahwa waktu pengerasan beton geopolimer berbasis fly ash kalsium tinggi dapat lebih lama. dan mempengaruhi peningkatan kuat tekannya [12]. Penambahan boraks dengan dosis yang lebih dari 20% menunjukkan pengaruh yang menurun pada waktu pengerasan dan kemampuan kerja [13]. Studi mortar geopolimer berbasis fly ash kelas C dengan penambahan boraks sebesar 5% ini dilakukan untuk mengetahui mekanik, untuk nantinya sebagai material pembuatan bahan bangunan seperti keramik ubin, panel, ornament arsitektural dan lain-lain.

## 2. METODE

### Material

#### Fly ash

Fly ash pada penelitian ini digunakan Kelas C (*high calcium*) yang berasal dari PLTU Paiton. Komposisi kimia fly ash diperoleh pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) ditunjukkan pada Tabel 1. Berdasarkan ASTM C 618 fly ash dari PLTU Paiton memiliki total prosentase berat  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  lebih dari 50% dan kandungan CaO diantara 8 – 20%.

**Tabel 1.** Komposisi kimia fly ash

Komposisi	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	CaO	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	C*
%	12.66	30.20	0.862	0.798	10.90	0.609	5.492	38.20

\*Analyzed as balance

Sumber: Pengujian bahan, 2023

#### Agregat halus

Agregat halus yang digunakan berasal dari Merapi dengan berat jenis 2.6 (SSD). Ukuran pasir yang digunakan pada penelitian ini adalah lolos ayakan 4.8 mm.

#### Alkali aktivator

Larutan aktivator yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari Natrium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan Natrium Hidroksida (NaOH). Natrium silikat diproduksi oleh PT. Sinar Sakti Kimia. memiliki komposisi  $\text{SiO}_2$  31.45% dan  $\text{Na}_2\text{O}$  14.34% dan kadar air 54.21%. Natrium hidroksida dalam bentuk pellet padat diproduksi oleh PT. Asahimas Chemical. Molaritas larutan natrium hidroksida yang digunakan adalah 10 M dan 12 M. Rasio alkali aktivator (*R*) ditetapkan 2. dan rasio alkali aktivator terhadap cementitious digunakan 0.3. 0.35 dan 0.4.

### Mix Design

Mix desain mortar geopolimer pada penelitian ini digunakan metode perhitungan volume absolut. Perhitungan volume absolut didasarkan pada proporsi volume absolut dari masing-masing material penyusun dalam  $1 \text{ m}^3$  [14], [15]. Perhitungan komposisi mortar geopolimer didasarkan bahwa volume rongga agregat halus terisi sepenuhnya dengan pasta geopolimer. Rasio volume absolut pasta geopolimer ( $V_p$ ) dibandingkan dengan volume rongga agregat halus ( $V_{rah}$ ) ditetapkan sebagai parameter  $R_m$  mix desain. Volume absolut pasta geopolimer dalam  $1 \text{ m}^3$  dihitung dengan persamaan (1). Volume absolut agregat halus dihitung berdasarkan persamaan (2) dan volume rongga agregat halus dalam  $1 \text{ m}^3$  dapat dihitung dengan persamaan (3).

$$\frac{B_{fa}}{G_{fa}\gamma_{sa}} + \frac{B_{ss}}{G_{ss}\gamma_{sa}} + \frac{B_{sh}}{G_{sh}\gamma_{sa}} = 1 \text{ m}^3 \quad (1)$$

$$V_{ah} = \frac{B_{sah}}{G_{ah}\gamma_{sa}} \quad (2)$$

$$V_{rah} = 1 - \frac{B_{sah}}{G_{ah}\gamma_{sa}} \quad (3)$$

Campuran mortar yang didasarkan pada parameter  $R_m$  dan volume pasta geopolimer. maka campuran mortar geopolimer dihitung berdasarkan persamaan (4) dan kebutuhan agregat halus dihitung dengan persamaan (5).

$$\frac{B_{fa}}{G_{fa}\gamma_{sa}} + \frac{B_{ss}}{G_{ss}\gamma_{sa}} + \frac{B_{sh}}{G_{sh}\gamma_{sa}} = R_m V_{rah} \quad (4)$$

$$R_m V_{rah} + \frac{B_{sah}}{G_{ah}\gamma_{sa}} = 1m^3 \quad (5)$$

Dimana :  $B_{fa}$  berat fly ash,  $G_{fa}$  berat jenis fly ash,  $B_{ss}$  berat natrium silikat,  $G_{ss}$  berat jenis natrium silikat,  $B_{sh}$  berat natrium hidroksida,  $G_{sh}$  berat jenis natrium hidroksida,  $V_{ah}$  volume agregat halus,  $B_{sah}$  berat satuan agregat halus,  $G_{ah}$  berat jenis agregat halus,  $V_{rah}$  volume rongga agregat halus,  $\gamma_{sa}$  berat satuan air.

Parameter  $R_m$  pada penelitian ini digunakan 1.5 dan 2.0. Penambahan boraks pada mortar geopolimer sebesar 5% dari massa fly ash. Tabel 2 menunjukkan mix desain campuran mortar geopolimer.

### Mixing dan Curing

Pembuatan campuran mortar geopolimer dilakukan dengan tahapan berikut :

1. Fly ash dan boraks dicampurkan, lalu diaduk.
2. Larutan alkali aktivator ditambahkan dan diaduk sampai homogen.
3. Pasir ditambahkan kedalam pasta geopolimer dan diaduk.
4. Mortar geopolimer siap untuk dicetak.

Mortar geopolimer yang telah dicetak, lalu disimpan pada temperature ruangan selama 24 jam. Mortar geopolimer yang sudah mengeras dikeluarkan dari cetakan, lalu dilakukan perawatan dengan cara disimpan dalam plastik.

**Tabel 2.** Proporsi kebutuhan bahan mortar geopolimer

No Mix	Molaritas NaOH	$R_m$	A	FA kg/m <sup>3</sup>	SS kg/m <sup>3</sup>	SH kg/m <sup>3</sup>	AH kg/m <sup>3</sup>	Boraks kg/m <sup>3</sup>
1	10	1.5	0.30	1128.38	112.84	225.68	1025.00	56.42
2	10	1.5	0.35	1065.52	124.31	248.62	1025.00	53.28
3	10	1.5	0.40	1009.30	134.57	269.15	1025.00	50.46
4	10	2.0	0.30	1504.51	150.45	300.90	489.00	75.23
5	10	2.0	0.35	1420.70	165.75	331.50	489.00	71.03
6	12	2.0	0.40	1345.73	179.43	358.86	489.00	67.29
7	12	1.5	0.30	1128.38	112.84	225.68	1025.00	56.42
8	12	1.5	0.35	1065.52	124.31	248.62	1025.00	53.28
9	12	1.5	0.40	1009.30	134.57	269.15	1025.00	50.46
10	12	2.0	0.30	1504.51	150.45	300.90	489.00	75.23
11	12	2.0	0.35	1420.70	165.75	331.50	489.00	71.03
12	12	2.0	0.40	1345.73	179.43	358.86	489.00	67.29

FA = fly ash, SS = natrium silikat, SH = natrium hidroksida, AH = agregat halus

Sumber: *Perhitungan data primer, 2023*

### Flowability dan Kuat Tekan

Adukan mortar geopolimer dilakukan pengujian flowability untuk mengukur kemampuan suatu bahan atau material untuk mengalir dengan lancar atau mudah sesuai dengan ASTM C 1437 [16]. Pengujian kuat tekan mortar geopolimer dilakukan pada umur 28 hari menggunakan sampel berukuran 50 x 50 x 50 mm berdasarkan ASTM C109 [17].

## 3. HASIL DAN DISKUSI

### Flowability

Pengujian flowability mortar geopolimer dilakukan sebelum campuran mortar geopolimer dimasukkan kedalam cetakan. Flowability mortar geopolimer pada penelitian ini dievaluasi dengan mengukur diameter aliran mortar geopolimer seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

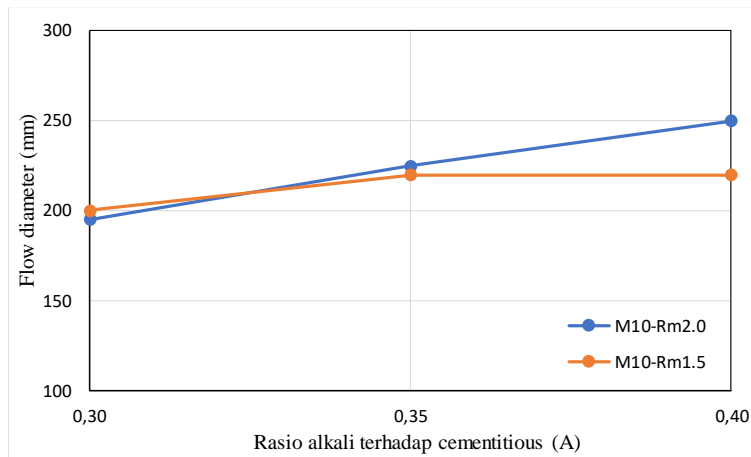
Pada Gambar 2 dan Gambar 3, menunjukkan hubungan flowability dan rasio alkali terhadap cementitious mortar geopolimer 10 M dan 12 M pada rasio volume absolut pasta geopolimer terhadap volume rongga agregat halus ( $R_m$ ) yang berbeda, yaitu 1.5 dan 2.0. Pasta geopolimer 10 mol pada  $R_m$  sebesar 2, menunjukkan kemampuan mengalir yang lebih tinggi dibandingkan dengan  $R_m$  sebesar 1.5. Nilai  $R_m$  yang semakin besar menghasilkan volume pasta geopolimer semakin luas mengisi volume pori agregat halus, yang menurunkan viskositas mortar untuk mengalir. Dengan peningkatan rasio alkali terhadap cementitious (A), tentunya kebutuhan cairan alkali pada pasta geopolimer meningkat dan menambah flowability mortar. Tingkat flowability antara larutan alkali 10 mol dan 12 mol tidak menunjukkan nilai

signifikan. Menurunkan molaritas larutan alkali aktivator menurunkan viskositas dan meningkatkan kemampuan mengalir pasta geopolimer [18].



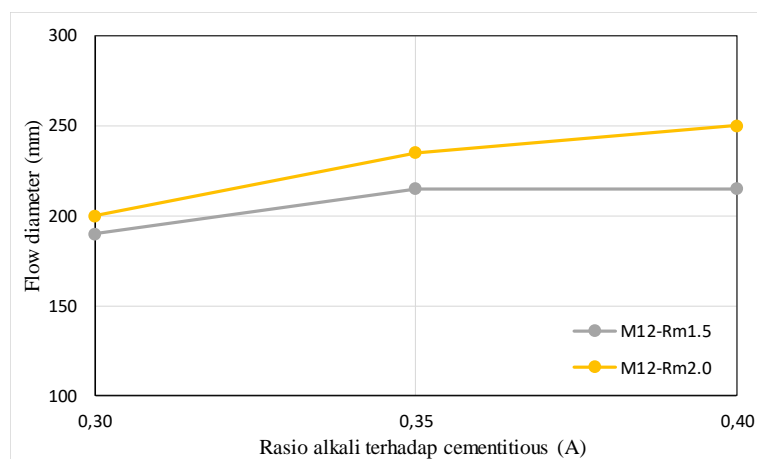
Sumber: Pengujian bahan, 2023

**Gambar 1.** Pengujian flowability mortar geopolimer



Sumber: Pengolahan data, 2023

**Gambar 2.** Hubungan flowability dan rasio alkali terhadap cementitious mortar geopolimer 10 M



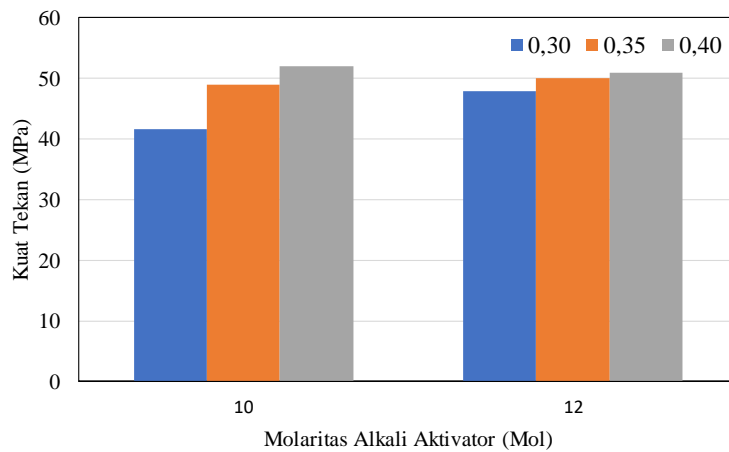
Sumber: Pengolahan data, 2023

**Gambar 3.** Hubungan flowability dan rasio alkali terhadap cementitious mortar geopolimer 12 M

## Kuat Tekan

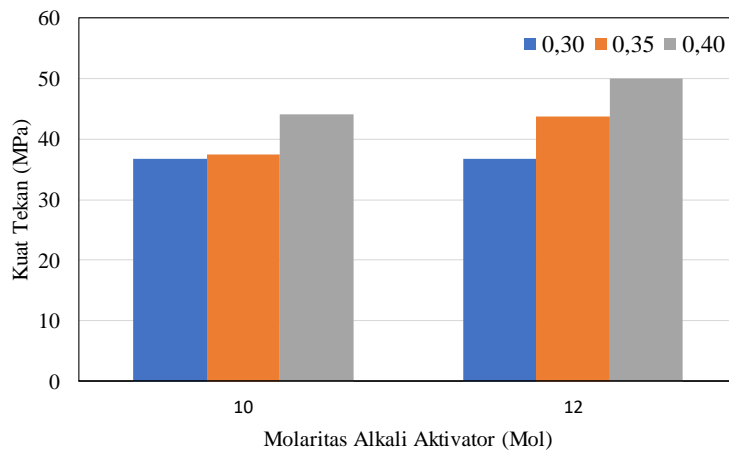
Molaritas dan Kuat tekan

Hubungan molaritas dan kuat tekan pada rasio  $R_m$  1.5 dan 2.0 ditunjukkan Gambar 4 dan 5. Molaritas larutan alkali aktivator yang lebih besar memberikan kuat tekan mortar geopolimer. Peningkatan rasio alkali terhadap cementitious pada mix desain mortar geopolimer, memicu pencucian ion Al dan Si semakin meningkat dan membentuk gel aluminosilikat. Molaritas 12 mol pada mortar geopolimer pada rasio perbandingan  $R_m$  1.5 dan 2.0 menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan 10 mol. Molaritas larutan natrium hidroksida pada beton geopolimer memegang peranan yang sangat penting pada proses geopolimerisasi. Kehadiran ion natrium pada jumlah yang besar, mampu mempercepat laju disolusi fly ash yang membentuk gel aluminosilikat [19]–[21]. Gel aluminosilikat memiliki kekuatan yang tinggi dan kekerasan.



Sumber: Pengolahan data, 2023

**Gambar 4.** Hubungan molaritas dan kuat tekan mortar geopolimer pada  $R_m$  1.50

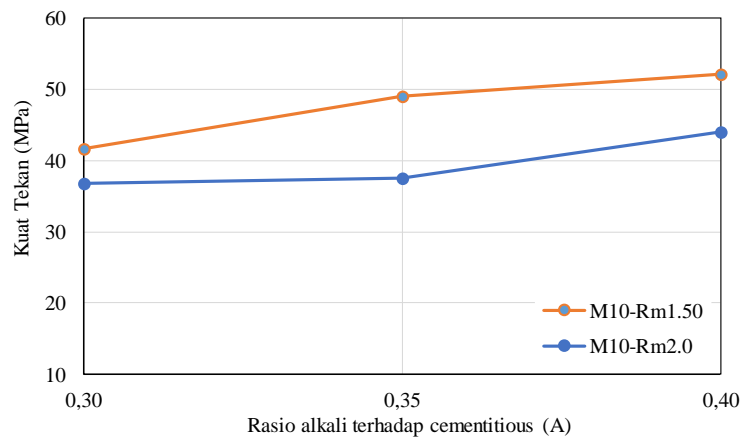


Sumber: Pengolahan data, 2023

**Gambar 5.** Hubungan molaritas dan kuat tekan mortar geopolimer pada  $R_m$  2.0

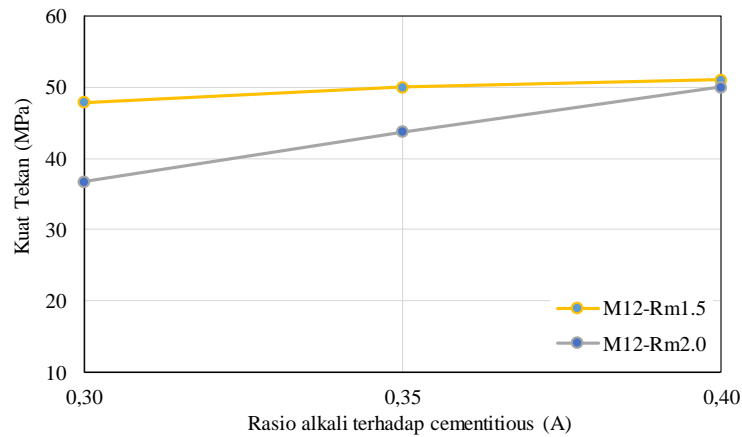
*Rasio alkali terhadap cementitious dan kuat tekan*

Peningkatan rasio alkali aktivator terhadap fly ash memberikan pengaruh yang baik terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Peningkatan kuat tekan akibat rasio alkali terhadap fly ash pada molaritas 10 mol dan 12 mol ditunjukkan Gambar 6 dan 7. Peningkatan rasio alkali pada mortar geopolimer sama dengan peningkatan larutan alkali aktivator mortar. Dengan peningkatan larutan alkali proses geopolimerisasi yang memicu disolusi  $SiO_2$  dan  $Al_2O_3$  semakin besar, menghasilkan laju geopolimerisasi yang tinggi dan meningkatkan kuat tekan.



Sumber: Pengolahan data, 2023

**Gambar 6.** Hubungan rasio alkali terhadap cementitious dan kuat tekan pada molaritas 10 mol



Sumber: Pengolahan data, 2023

**Gambar 7.** Hubungan rasio alkali terhadap cementitious dan kuat tekan pada molaritas 12 mol

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini memaparkan flowability dan kuat tekan mortar geopolimer berbasis fly ash kelas C yang diaktivasi menggunakan alkali (natrium silikat dan natrium hidroksida). Molaritas larutan natrium hidroksida digunakan 10 M dan 12 M, sedangkan rasio alkali aktivator (R) sebesar 2. Rasio pasta terhadap volume rongga agregat ( $R_m$ ) digunakan 1.5 dan 2.0. Rasio alkali aktivator terhadap cementitious ditetapkan sebesar 0.3, 0.35 dan 0.4. Semua sampel kubus mortar dilakukan curing pada temperature ruangan. Berdasarkan penelitian ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Peningkatan rasio volume absolut pasta geopolimer ( $V_p$ ) dibandingkan dengan volume rongga agregat halus ( $V_{rah}$ ) meningkatkan viskositas mortar. Dengan peningkatan rasio alkali terhadap cementitious (A), tentunya kebutuhan cairan alkali pada pasta geopolimer meningkat dan menambah flowability mortar.
2. Kuat tekan mortar geopolimer dengan penambahan borak 5% terhadap nilai molaritas, rasio alkali/cementitious tidak menunjukkan dampak negative pada sifat mekanik mortar geopolimer.
3. Rasio alkali/cementitious sebesar 0.3, 0.35 dan 0.4 pada mortar geopolimer berbasis kelas C dengan penambahan borak 5% menunjukkan workability yang baik, sehingga dapat digunakan sebagai bahan dasar pembuatan material arsitektural.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didana oleh Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset dan Teknologi - Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, Dan Teknologi Tahun 2023.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Davidovits, "Global warming impact on the cement and aggregates industries," *World Resour. Rev.*, vol. 6, no. 2, pp. 263–278, 1994.
- [2] J. Davidovits, "Geopolymers and geopolymeric materials," *J. Therm. Anal.*, vol. 35, no. 2, pp. 429–441, 1989, doi: 10.1007/BF01904446.
- [3] A. Noushini and A. Castel, "The effect of heat-curing on transport properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 464–477, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.210.
- [4] ASTM C 618, *C 618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*, no. C. 2003.
- [5] P. Chindaprasirt, P. De Silva, K. Sagoe-Crentsil, and S. Hanjitsuwan, "Effect of SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems," *J. Mater. Sci.*, vol. 47, no. 12, pp. 4876–4883, 2012, doi: 10.1007/s10853-012-6353-y.
- [6] X. Guo, H. Shi, and W. A. Dick, "Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymer," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 2, pp. 142–147, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>.
- [7] E. I. Diaz, E. N. Allouche, and S. Eklund, "Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers," *Fuel*, vol. 89, no. 5, pp. 992–996, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.09.012>.
- [8] U. Rattanasak, K. Pankhet, and P. Chindaprasirt, "Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer," *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, vol. 18, no. 3, pp. 364–369, 2011, doi: 10.1007/s12613-011-0448-3.
- [9] P. Chindaprasirt, T. Chareerat, and V. Sirivivatnanon, "Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 3, pp. 224–229, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.002>.
- [10] A. Kusbiantoro, M. S. Ibrahim, K. Muthusamy, and A. Alias, "Development of Sucrose and Citric Acid as the Natural based Admixture for Fly Ash based Geopolymer," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 17, pp. 596–602, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.02.075>.
- [11] A. S. Buchanan and K. Worner, "A Study of the Action of Borax in Retarding the Setting of Plaster of Paris," *J. Soc. Chem. Ind.*, vol. 65, no. 1, pp. 23–26, 1946.
- [12] A. Antoni, S. W. Wijaya, J. Satria, A. Sugiarto, and D. Hardjito, "The use of borax in deterring flash setting of high calcium fly ash based geopolymer," *Mater. Sci. Forum*, vol. 857, pp. 416–420, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.857.416.
- [13] A. Antoni, A. A. T. Purwantoro, W. S. P. D. Suyanto, and D. Hardjito, "Fresh and Hardened Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Matrix with High Dosage of Borax," *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Civ. Eng.*, vol. 44, no. 1, pp. 535–543, 2020, doi: 10.1007/s40996-019-00330-7.
- [14] I. Satyarno, A. P. Solehudina, C. Meyartoa, D. Hadiyatmoko, P. Muhammadiyah, and R. Afrana, "Practical method for mix design of cement-based grout," *Procedia Eng.*, vol. 95, pp. 356–365, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.12.194.
- [15] R. Cornelis, H. Priyosulistyo, I. Satyarno, and rohmadi, "Workability and Strength Properties of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Mortar," *Int. Conf. Sustain. Civ. Eng. Struct. Constr. Mater. (SCESCM 2018)*, vol. Volume 258, p. 6, 2019, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925801009>.
- [16] ASTM C1437, *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2007.
- [17] ASTM C109/C109M, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2016. doi: 10.1520/C0109.
- [18] I. Pundienė, J. Pranckevičienė, C. Zhu, and M. Kligys, "The role of temperature and activator solution molarity on the viscosity and hard structure formation of geopolymer pastes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 272, p. 121661, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121661>.
- [19] V. Srinivasa Reddy, K. V. Krishna, M. V. S. Rao, and S. Shrihari, "Effect of molarity of sodium hydroxide and molar ratio of alkaline activator solution on the strength development of geopolymer concrete," *E3S Web Conf.*, vol. 309, pp. 0–5, 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202130901058.

- [20] N. Aida Mohd Mortar, H. Kamarudin, R. A. Rafiza, T. A. F. Meor, and M. Rosnita, "Compressive Strength of Fly Ash Geopolymer Concrete by Varying Sodium Hydroxide Molarity and Aggregate to Binder Ratio," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 864, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/864/1/012037.
- [21] N. Kumar Verma, M. Chakradhara Rao, and S. Kumar, "Effect of molarity of NaOH and alkalinity ratio on compressive strength of geo-polymer concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 64, pp. 940–947, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.687>.