

## PENGARUH KADAR AKTIVATOR DAN RASIO SS/SH PADA BETON GEOPOLIMER TERHADAP KUAT TEKAN

Agus Setiya Budi<sup>1</sup> dan Jericho Fernandez Tampubolon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta  
Email: agussb@staff.uns.ac.id*

<sup>2</sup>*Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret, Jl. Ir. Sutami 36 A Surakarta  
Email: fernandezjerichot@student.uns.ac.id*

### ABSTRACT

Conventional concrete has a significant impact on the carbon footprint due to its production process, particularly the manufacturing of its main component, cement. Therefore, efforts to find alternative materials to replace cement in concrete production are urgently needed. One such alternative is geopolymer concrete. Geopolymer concrete differs from conventional concrete in its reaction mechanism, which involves polymerization. This type of concrete utilizes waste from coal combustion, specifically fly ash, which requires an activator to bind the mixture of fly ash with sand and gravel. This study examines the effect of activator content and variations in the SS/SH ratio on the compressive strength of concrete at 28 days of age. The chemical materials used to activate the polymerization reaction in fly ash are alkaline hydroxide and alkaline silica or sodium silicate (SS) and sodium hydroxide (SH). The research method employed is an experimental approach conducted in a laboratory using cylindrical specimens with a height of 30 cm and a diameter of 15 cm. The activator content used is 0.33 for the ratio of alkali to fly ash, with SS/SH variations of 0.5, 1.0, and 1.5. Based on the experimental results, the maximum compressive strength achieved was 41.16 MPa at an SS/SH ratio of 1.5.

**Keywords:** geopolymer concrete, fly ash, compressive strength

### ABSTRAK

Beton konvensional memiliki dampak yang signifikan terhadap jejak karbon yang diakibatkan karena proses produksinya, terutama pembuatan bahan utamanya, yaitu semen. Oleh karena itu diperlukan segera upaya untuk mencari material lain sebagai pengganti semen dalam pembuatan beton. Salah satu pengganti semen dalam pembuatan beton adalah dengan beton geopolimer. Beton geopolimer merupakan beton yang memiliki reaksi berbeda dengan beton konvensional yaitu reaksi polimerisasi. Beton ini menggunakan limbah dari hasil pembakaran batu bara berupa fly ash yang membutuhkan aktivator untuk mengikat campuran fly ash dengan pasir dan kerikil. Penelitian ini akan meninjau pengaruh kadar aktivator dan variasi rasio SS/SH terhadap kuat tekan beton pada umur 28 hari. Bahan kimia yang digunakan untuk mengaktifkan reaksi polimerisasi pada fly ash adalah dengan menggunakan alkali hidroksida dan alkali silika atau dengan sodium silikat (SS) dan sodium hidroksida (SH). Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimen yang dilakukan di laboratorium dengan benda uji silinder tinggi 30 cm dan diameter 15 cm dengan menggunakan kadar aktivator 0,33 untuk perbandingan alkali dengan fly ash dan variasi SS/SH sebesar 0,5 ; 1,0 ; dan 1,5. Berdasarkan hasil eksperimen didapat kuat tekan maksimum sebesar 41,16 MPa pada rasio SS/SH 1,5.

**Kata kunci:** beton geopolimer, fly ash, kuat tekan

## 1. PENDAHULUAN

Berkembangnya teknologi secara pesat menyebabkan pembangunan infrastruktur berkembang secara signifikan baik dari segi kualitas, waktu, dan kemudahan dalam pekerjaan. Penggunaan semen secara global terus meningkat dari waktu ke waktu, dan ketergantungan pada bahan baku dalam produksinya memiliki dampak negatif terhadap lingkungan. Selain itu, produksi semen mengonsumsi sejumlah besar energi, menjadikannya salah satu penyumbang utama emisi karbondioksida (Obonyo, dkk, 2014) dan (Almufarji, dkk, 2019). Industri semen global melepaskan sekitar 1,35 miliar ton gas rumah kaca setiap tahun, yang menyumbang sekitar 7% dari total emisi gas rumah kaca buatan manusia ke atmosfer (Hardjito, dkk, 2004) dan (Abed, 2019). Selain itu, telah diamati bahwa banyak struktur beton, terutama yang dibangun di lingkungan yang keras atau korosif, mulai mengalami

Corresponding Author

E-mail Address : agussb@staff.uns.ac.id

kerusakan dalam 20 hingga 30 tahun, meskipun dirancang untuk bertahan lebih dari 50 tahun (Malhotra, 2002). Industri konstruksi sangat antusias untuk mengadopsi alternatif berkelanjutan terhadap Ordinary Portland Cement (OPC) yang tetap mempertahankan kekuatan dan daya tahan sekaligus meminimalkan emisi gas rumah kaca (Junaid, dkk, 2015).

Bahan konstruksi yang vital dalam pembangunan infrastruktur adalah beton. Beton berasal dari bahan utama semen dan dalam produksinya menyebabkan pelepasan gas CO<sub>2</sub> dengan jumlah yang sebanding dengan volume semen yang dihasilkan (Setiawati, dkk., 2022). Emisi karbon yang disebabkan dalam proses pembuatan semen harus dikurangi, oleh karena itu dibutuhkan suatu beton inovasi yang dimana dalam proses pembuatannya menghasilkan sedikit emisi karbon. Salah satu dari beton inovasi itu adalah beton geopolimer yang menggunakan *fly ash* sebagai pengikat utama yang memiliki kandungan alami alumina (Al) dan silika (Si), seperti *fly ash* (Davidovits, 1997).

Banyak penelitian telah berfokus pada pengurangan konsumsi semen dengan memanfaatkan limbah atau sumber daya alam, seperti bahan pozolan, yang memberikan hasil yang menjanjikan (Albegmprli, dkk, 2022) dan (Heah, dkk, 2012). Bahan alternatif yang tidak mengandung semen ini dikenal sebagai Geopolymer (Shahedan, dkk, 2019). Geopolimer tahan terhadap paparan suhu tinggi karena material siliko aluminatnya yang amorf hingga semi-kristalin (Davidovits, 1991) dan (Davidovits, 2002). Pasta beton geopolimer terbuat dari material dasar *fly ash* yang mengandung alumina dan silika yang berperan sebagai *binder* dari beton. *Fly ash* dapat digunakan sebagai material alternatif pengganti semen dalam pembangunan infrastruktur (Budiningrum, dkk., 2021). Bahan yang ditambahkan adalah aktivator berupa natrium silikat (SS) dan natrium hidroksida (SH) berupa Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> dan NaOH bermolaritas 10 M.

Maksud dari penelitian ini adalah bagaimana pengaruh kadar dan rasio aktivator terhadap workabilitas dan kekuatan tekan dari beton geopolimer dengan bahan dasar *fly ash*. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan kepada pembaca mengenai beton geopolimer sebagai beton inovatif. Campuran semen, agregat kasar dan halus, dan air, dengan tambahan campuran lain disebut dengan beton (Badan Standarisasi Nasional, 2019). Beton adalah tipe konstruksi yang sangat umum digunakan pada industri. Semen *portland* atau semen hidraulik lainnya bertindak sebagai bahan pengikat dan sangat penting dalam produksi beton pada umumnya. (Gandina dan Setiyarto, 2020).

Beton geopolimer memiliki keunggulan seperti memiliki kekuatan tekan yang tinggi, sifat mekanik baik, laju difusi klorida yang rendah, tahan api dan, memiliki ketahanan panas yang stabil (Panjaitan dan Herliana, 2020). Beton geopolimer sama sekali tidak menggunakan semen dalam proses pembuatannya dan memiliki ketersediaan bahan baku yang bahkan melimpah di Indonesia. Semen diganti dengan *fly ash* dan ditambah larutan alkali aktivator yang akan bereaksi dengan kandungan silika dan alumina pada *fly ash* yang kemudian membentuk *binder* beton geopolimer. Beton geopolimer lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan beton konvensional namun juga memiliki beberapa kekurangan yaitu memiliki biaya dan kualitas material yang cukup tinggi serta penyusutan beton yang cukup tinggi juga (Gandina dan Setiyarto, 2020).

Menurut ASRM C618, (2000), *fly ash* didefinisikan sebagai partikel yang terbentuk dari sisa pengabuan batu bara yang diklasifikasikan menjadi dua jenis, sebagai berikut.

- 1) Kelas C  
Pembakaran batubara lignit atau sub-bituminus (batubara ringan) yang menghasilkan CaO lebih besar dari 10%
- 2) Kelas F  
Pembakaran bitumen batu bara yang menghasilkan *fly ash* dengan kandungan CaO lebih kecil dari 10%

Kekuatan tekan dari beton geopolimer dipengaruhi oleh berbagai aspek, yaitu mulai dari rasio alkali aktivator, suhu yang digunakan dan waktu yang ditentukan berdasarkan proses perawatan, serta molaritas yang dimiliki oleh NaOH (Panjaitan dan Herliana, 2020). Molaritas yang baik dalam pembuatan beton geopolimer adalah dengan NaOH sebesar 10 M – 16 M (Ahmed, dkk., 2021). Nilai rasio SS/SH akan mencapai puncak pada perbandingan 2,5 menggunakan peningkatan temperatur selama 24 jam. Proses pembuatan beton geopolimer juga memiliki banyak metode pembuatan diantaranya adalah secara langsung, terpisah, dan penuangan langsung (Rizky, dkk., 2022).

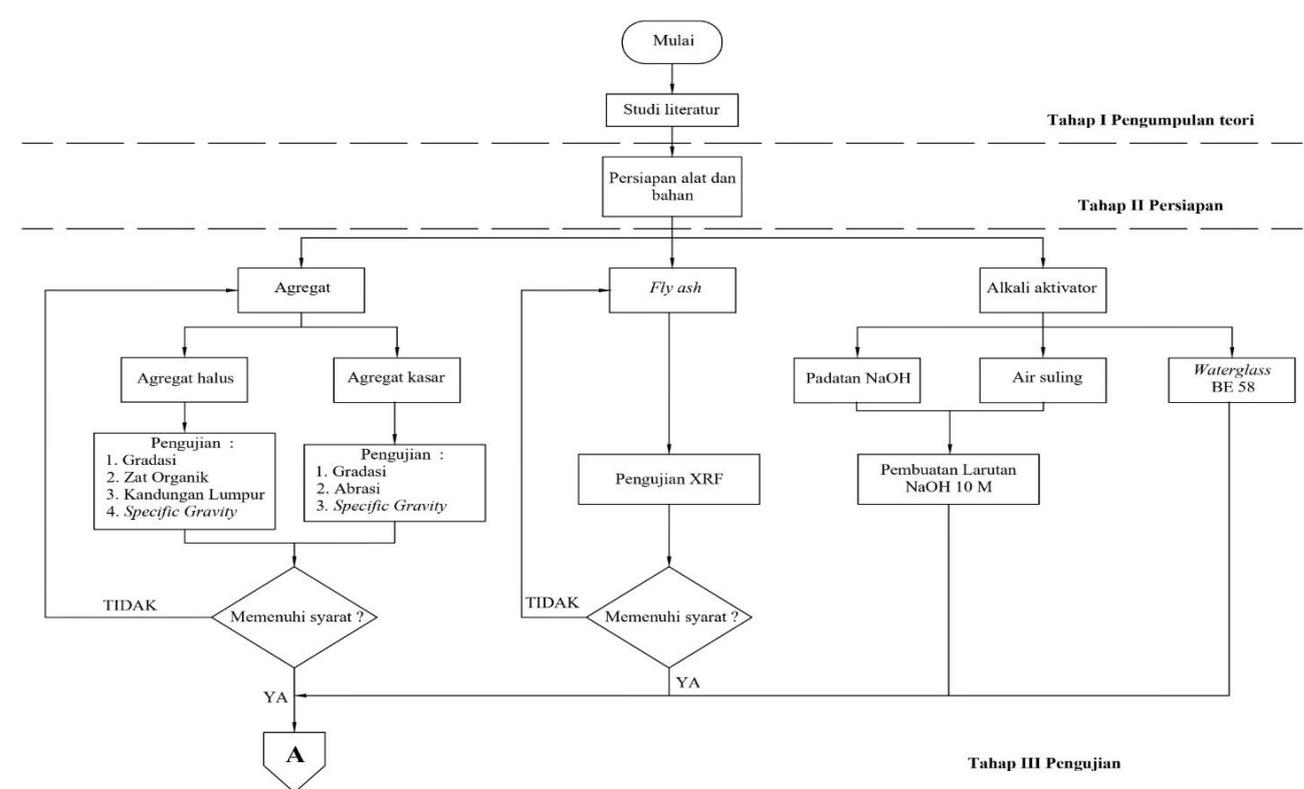
Belum adanya peraturan yang pasti untuk beton geopolimer ini, maka pendekatan desain dilakukan sesuai dengan beton konvensional. Standar teknis yang digunakan sebagai parameter adalah SNI 2847–2019 yang menjelaskan bahwa syarat kuat tekan beton untuk umum adalah masing-masing minimum 17 MPa dengan tidak ada batasan nilai maksimum dan beton normal sistem rangka pemikul momen khusus (SPRMK) dengan batasan minimum 21 MPa dan maksimum 35 MPa. Perancangan campuran beton geopolimer ini diharapkan memenuhi syarat yang diberikan oleh SNI.

## 2. METODE

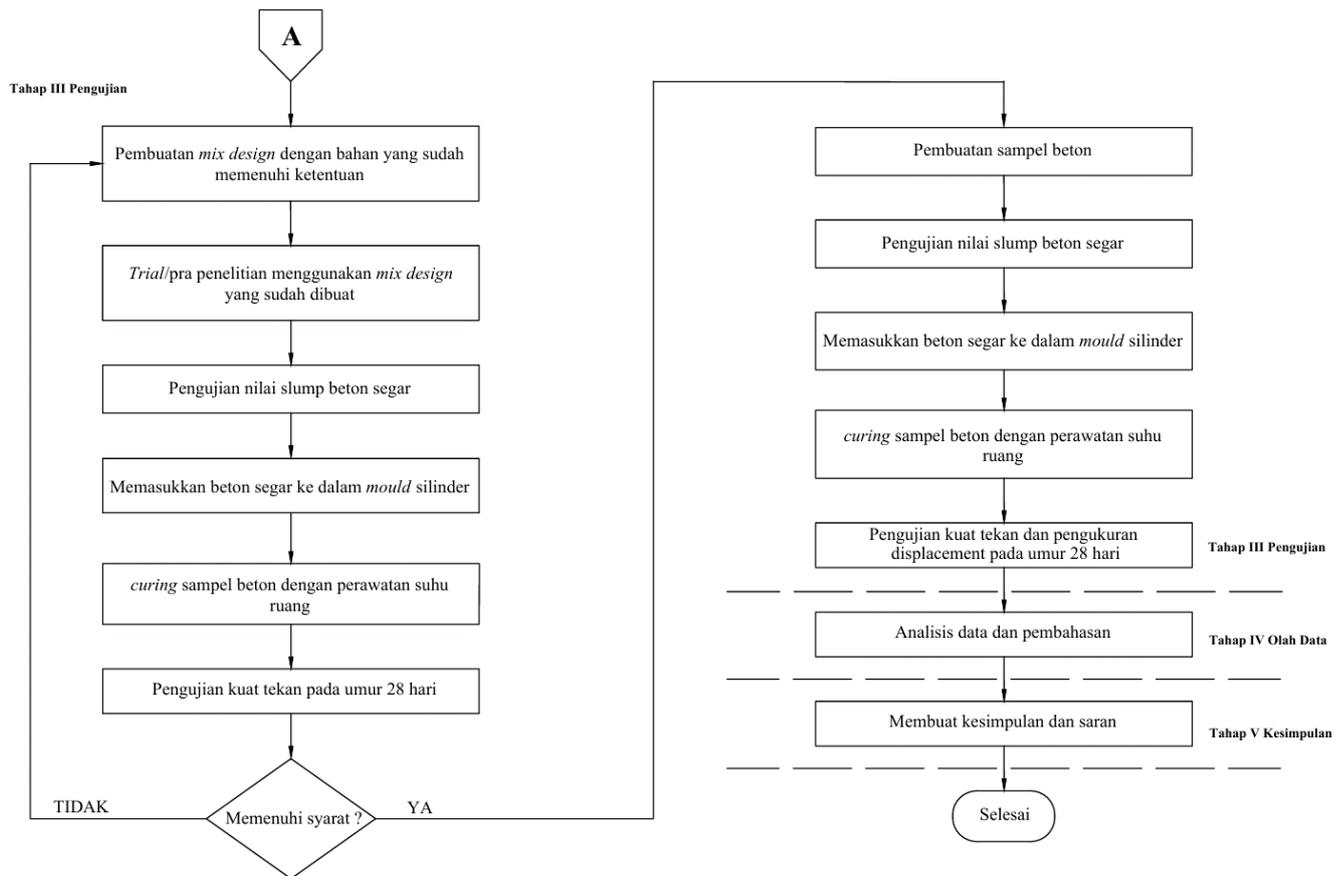
Penelitian yang dilakukan adalah penelitian secara eksperimen kuantitatif pada beton geopolimer dengan menggunakan variasi SS/SH 0,5, 1,0, dan 1,5. Penelitian ini memiliki variabel terikat nilai kuat tekan dan variabel bebas rasio aktivator yang digunakan. Pengujian dilaksanakan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret dengan jumlah benda uji sebanyak 15 buah sampel yang diuji dengan 2 jenis pengujian kuat tekan dan *slump*. Metode pengumpulan data pada proses awal dilakukan melalui studi pustaka dan observasi langsung di lapangan. Observasi secara langsung pada saat uji laboratorium merupakan data primer penelitian ini dengan data sekunder yang diperoleh berdasarkan data supplier *fly ash* dan *alkaline activator*.

Secara umum penelitian ini memiliki 5 tahapan. Detil alur penelitian ini disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2. Pada Gambar 1 menunjukkan tiga tahap penelitian, yaitu tahap peninjauan dan tahap persiapan. Sedangkan pada Gambar 2 menunjukkan tahap pengujian, tahap pengolahan data dan yang terakhir adalah tahap kesimpulan.

- 1) Peninjauan  
Dilakukan untuk penelitian literatur dari berbagai referensi jurnal penelitian, buku, dan skripsi yang berkaitan dengan beton geopolimer.
- 2) Persiapan  
Menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
- 3) Pengujian  
Meliputi semua bagian dari pengumpulan data, pengujian material, pembuatan *mix design*, melakukan *trial* benda uji, serta melakukan pengujian terhadap benda uji.
- 4) Pengolahan Data  
Mengolah data yang sudah didapat dari benda uji beton geopolimer.
- 5) Kesimpulan  
Penarikan kesimpulan tentang tujuan penelitian dan memberikan rekomendasi untuk pengembangan penelitian yang lebih baik.



Gambar 1. Diagram alir tahap penelitian kesatu dan kedua



Gambar 2. Diagram alir tahap penelitian ketiga, keempat dan kelima

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian pada penelitian ini memberikan data pengujian terhadap bahan penyusun beton geopolimer, dilanjutkan dengan contoh data yang akan diuji berupa pengujian kuat tekan dan kemampuan kerja (*workability*) beton geopolimer. Hasil akhir yang didapat dari pengujian material dan benda uji kemudian akan dibandingkan dengan standarisasi yang ada sehingga akan mendapat kesimpulan apakah benda uji sudah sesuai atau tidak sesuai dengan aturan dari pemerintah dan dapat diaplikasikan di lapangan.

Pengujian bahan penyusun beton geopolimer menggunakan acuan Standar Nasional Indonesia (SNI), Peraturan Beton Indonesia (PBI), dan *American Society for Testing and Material (ASTM)*. Pengujian ini meliputi pengujian gradasi, *specific gravity*, kadar lumpur, kadar zat organik, serta modulus kehalusan pada pasir dan *split*. Analisis data bahan dasar penyusun dan hasil pengujian *workabilitas* serta kekuatan tekan beton geopolimer akan ditampilkan dengan bentuk tabel dan grafik.

#### 1) Pengujian Agregat Halus

Pengujian agregat halus memiliki kegunaan penting untuk menentukan kualitas dari material, perencanaan campuran dan penentuan standarisasi untuk pengendalian mutu yang digunakan. Penelitian ini melakukan pengujian pada agregat halus seperti uji berat jenis pada saat kondisi SSD, kadar lumpur, kadar bahan organik; dan koefisien kehalusan. Tabel 1 menunjukkan hasil dari pengujian agregat halus.

Tabel 1. Pengujian agregat halus

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standarisasi	Spesifikasi
<i>Absorption</i>	1,94	-	-
<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,64	-	-
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,51	-	-

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standarisasi	Spesifikasi
Bulk Specific Gravity SSD	2,56	ASTM C 127	2,5-2,7
Kandungan Lumpur	4,20%	ASTM C 142	<5%
Kandungan Zat Organik	Kuning Muda	ASTM C 40-92	Kuning Muda
Modulus Kehalusan	2,7	ASTM C 136	1,5<MH<3,8

Berdasarkan hasil pengujian agregat halus yang sudah didapatkan, maka agregat halus yang digunakan sudah sesuai dengan *American Society for Testing and Material (ASTM)* dan bisa digunakan sebagai bahan penyusun beton geopolimer.

2) Pengujian Agregat Kasar

Agregat kasar diuji dengan pengujian seperti abrasi, modulus kehalusan, serta *specific gravity* dengan kegunaan yang sama dalam penentuan kualitas dan mutu dari beton geopolimer. Rincian data dari pengujian agregat kasar disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Pengujian agregat kasar

Pengujian	Hasil	Standarisasi	Spesifikasi
Abrasi	27,64	ASTM C 131	Maks. 40%
Penyerapan	2,15	ASTM C 128	Maks. 3%
Berat Jenis Curah	2,49		
Berat Jenis Semu	2,64		
Berat Jenis Semu kondisi SSD	2,55	ASTM C 127	2,5-2,7
Modulus Kehalusan	7,9	ASTM C 33	6<MH<7,1

Berdasarkan Tabel 2 didapatkan hasil untuk uji material agregat kasar sudah dapat menjadi penyusun beton geopolimer sesuai dengan *American Society for Testing and Material (ASTM)*.

3) Pengujian *Fly ash*

Pengujian *fly ash* ini menggunakan uji *X-Ray Fluorescence (XRF)*. Pengujian ini digunakan untuk mendapatkan persentase kandungan kimia dalam *fly ash*. Pada penelitian ini data XRF didapatkan dari data yang telah diberikan dari pihak penyedia *fly ash* seperti yang ditampilkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hasil pengujian *fly ash*

Parameter	Hasil Pengujian	Metode	Kesimpulan
SiO <sub>2</sub>	46,64		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,42		
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,59		
CaO	7,26	ASTM D 4326-13	Kadar CaO = 7,26%
MgO	4,05		Kadar SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +
Na <sub>2</sub> O	4,97		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = 77,65%
K <sub>2</sub> O	1,9		
SO <sub>3</sub>	1,7		

Berdasarkan pengujian XRF didapatkan kesimpulan *fly ash* yang digunakan sebagai bahan penyusun beton geopolimer sudah memenuhi standar *American Society for Testing and Material* (ASTM) dan dapat digunakan sebagai bahan penyusun beton geopolimer.

Tabel 4. Klasifikasi *fly ash* berdasarkan tipe

Tipe	CaO	SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Tipe F	<10%	>70%
Tipe C	>10%	>50%

Berdasarkan data hasil pengujian XRF dari PT. Adhi Persada Beton Sayegan sebagai *supplier fly ash* dapat diperoleh bahwa tipe *fly ash* yang diuji merupakan *fly ash* tipe F.

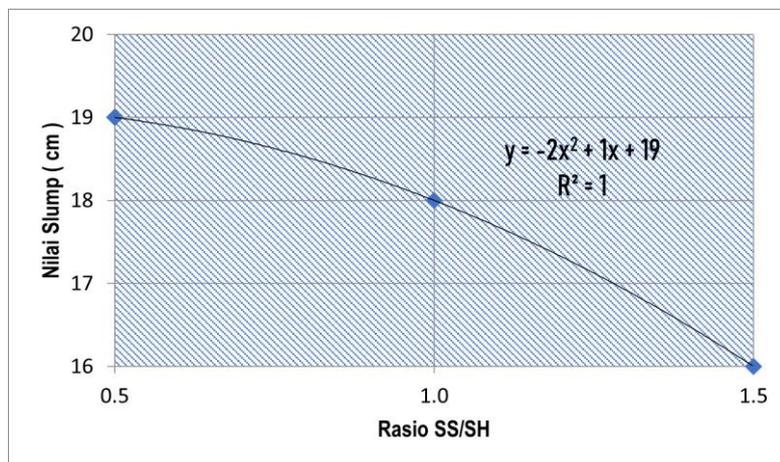
4) Workability Beton Geopolimer

*Slump test* dilakukan dengan mengukur tinggi beton yang dilepas dari cetakan kerucut *abrams*. Pengujian ini dilakukan menurut Metode Pengujian *Slump* Beton dari SNI 03-1972 1990. Rekapitulasi hasil *slump test* beton geopolimer dengan kadar aktivator 0,33 dan rasio perbandingan antara SS/SH (0,5-1,5) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil uji *slump* beton geopolimer

No.	Kode	Rasio SS/SH	Nilai <i>Slump</i> (cm)
1.	0,33GPC-0,5	0,5	19
2.	0,33GPC-1,0	1,0	18
3.	0,33GPC-1,5	1,5	16

Berdasarkan hasil *slump test* pada Tabel 5 didapatkan grafik hubungan antara nilai *slump* dan rasio SS/SH.



Gambar 3. Grafik hubungan antara rasio sodium silikat/sodium hidroksida dengan nilai *slump*

Berdasarkan Tabel 5 dan Gambar 3, terjadi penurunan nilai *slump* seiring dengan peningkatan rasio alkali aktivator pada beton geopolimer. Penurunan nilai *slump* ini disebabkan oleh meningkatnya Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> serta menurunnya komposisi NaOH pada campuran beton geopolimer sehingga mengubah sifat beton segar menjadi semakin pekat. Dengan menurunnya nilai *slump* maka akan berpengaruh pada *workability* pada beton geopolimer. Pengujian *slump* ini menyimpulkan bahwa semakin besar rasio SS/SH yang digunakan akan menyebabkan meningkatnya kesulitan dalam pengerjaan.

5) Kekuatan Tekan Beton Geopolimer

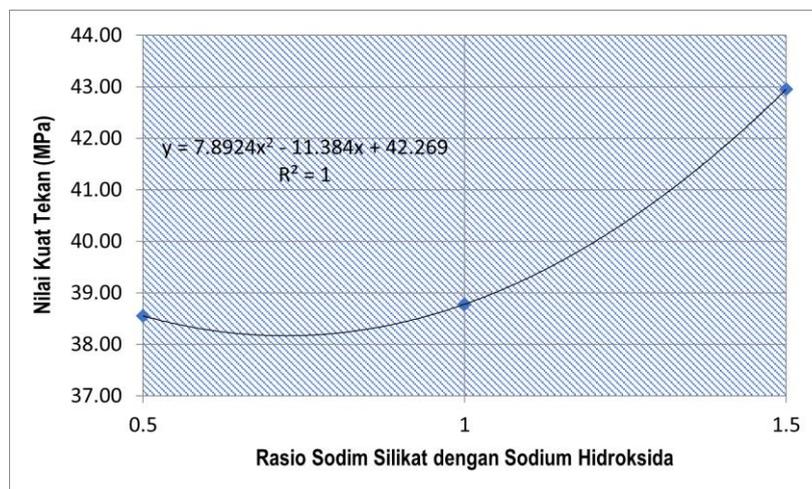
Tujuan dari pengujian kekuatan tekan beton adalah untuk mengetahui seberapa besar beban maksimum yang dapat ditanggung oleh beton. Pengujian kekuatan tekan beton geopolimer diuji dengan cara yang sama

dengan beton konvensional yaitu menggunakan alat *compression testing machine* (CTM), dengan mengacu pada SNI 1974:2011 mengenai “Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder”. Kekuatan tekan beton memiliki keterkaitan dengan yang penting dengan mutu beton. Kekuatan tekan beton sendiri dipengaruhi oleh pengaturan perbandingan semen, agregat halus dan kasar, serta air. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan, didapatkan nilai kekuatan tekan dengan peningkatan yang berbanding lurus dengan meningkatnya rasio SS/SH yang digunakan. Kekuatan tekan yang dimiliki oleh beton geopolimer dengan kadar aktivator 0,33 dan rasio SS/SH sudah mencukupi standar SRPMK yang mensyaratkan untuk kekuatan tekan minimal sebesar 21 MPa. Rekapitulasi pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan kadar aktivator 0,33 dan rasio SS/SH (0,5-1,5) dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Rekapitulasi pengujian kuat tekan beton 0,33GPC-0,5; 1,0; 1,5

Kode Benda Uji	Kode Sampel	Load (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
0,33GPC-0,5	1	492	27,84	37,61
	2	656	37,12	
	3	680	38,48	
	4	728	41,20	
	5	767	43,40	
0,33GPC-1,0	1	639	36,16	38,25
	2	640	36,22	
	3	675	38,20	
	4	705	39,89	
	5	721	40,80	
0,33GPC-1,5	1	601	34,01	41,16
	2	730	41,31	
	3	748	42,33	
	4	774	43,80	
	5	784	44,37	

Berdasarkan data kuat tekan yang sudah diperoleh dari pengujian sampel, maka didapatkan grafik hubungan antara rasio SS/SH pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan antara rasio alkali aktivator terhadap kuat tekan

Berdasarkan Tabel 6 dan Gambar 4, terdapat peningkatan nilai kekuatan tekan seiring dengan bertambahnya rasio SS/SH pada beton geopolimer. Beton geopolimer dengan variasi SS/SH 0,5; 1,0; 1,5 dalam penelitian ini sudah memenuhi syarat sebagai beton normal dengan kegunaan dinding struktural dan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK) yang memiliki kuat tekan lebih minimum 21 MPa.

#### 4. KESIMPULAN

Hasil penelitian dan analisis perhitungan data yang diperoleh pada beton geopolimer dengan kadar aktivator 0,33 dan variasi SS/SH 0,5; 1,0; dan 1,5 pada umur 28 hari dengan *curing* suhu ruangan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Rasio SS/SH pada berat binder beton geopolimer memberikan pengaruh terhadap workabilitas beton geopolimer. Nilai *slump* untuk beton geopolimer dengan variasi rasio SS/SH 0,5; 1,0; dan 1,5 masing-masing adalah 19 cm, 18 cm, dan 16 cm.
2. Rasio SS/SH memberikan pengaruh terhadap kekuatan tekan beton geopolimer. Nilai kekuatan tekan beton untuk beton rasio SS/SH 0,5; 1,0; dan 1,5 masing-masing adalah 37,61 MPa, 38,25 MPa, dan 41,16 MPa. Nilai kuat tekan maksimum beton geopolimer dengan kadar aktivator 0,33 dengan rasio SS/SH (0,5-1,5) didapat ketika menggunakan perbandingan natrium silikat/natrium hidroksida sebesar 1,5 dengan nilai kekuatan tekan sebesar 41,16 MPa.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abed J. M. and H. S. Abed. (2019). "Effect of Partial Replacement of Fly Ash and Expanded Polystyrene waste on Properties of Geopolymer Concrete Bricks," *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 85-102, 2019.
- Albegmprli H. M., Z. K. A. Al-Qazzaz, and S. K. Rejeb. (2022). "Strength performance of alkali activated structural lightweight geopolymer concrete exposed to acid," *Ceram. Int.*, vol. 48, no. 5, pp. 6867-6873, 2022. doi: 10.1016/j.ceramint.2021.11.240.
- Ahmed, H. U., Mohammed, A. A., Mohammed, A. S., Mosavi, A., Sor, N. A., dan Qaidi, S. M. A. (2021). Compressive Strength of Sustainable Geopolymer Concrete Composites : A State-of-the-Art Review.
- Almufarji M. J., F. Hejazi, and A. A. Al-Attar. (2019). "Compressive strength of class F fly ash blended geopolymer-hybrid mortar," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 357, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/357/1/012019.
- ASTM Internasional. (2006). ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan.
- Budiningrum, D. S., Kustirni, A., Purnijanto, B., Mahasukma, D., Utama, T. Y. (2021). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash PLTU Tanjung Jati B Jepara. *Bangun Rekaprima Vol 07*, 55-61.
- Davidovits J. (1991). Geopolymers : Inorganic Polymeric New Material. *J Therm Anal* 1991;37:1633–56.
- Davidovits J. (1997). *Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*. France: Geopolymer Institute
- Davidovits J. (2002). 30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs. *Geopolymer Conf.*, Melbourne, Australia: 2002, p. 1–30. Doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- Gandina, N. L., & Setiyarto, Y. D. (2020). Studi Eksperimental Beton Geopolimer dengan Memanfaatkan Fly Ash Sebagai Pengganti Semen dan Serat MAT Sebagai Aditif. *CRANE*, 26-36.
- Hardjito D., S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan. (2004). "Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete," *Civ. Eng. Dimens.*, vol. 6, no. 2, pp. 88-93, 2004.
- Heah C. Y. et al. (2012). "Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers," *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 912-922, 2012.
- Junaid T, Kayali, A. Khennane, and J. Black. (2015). "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes," *Constr. Build. Mater.*, vol. 79, pp. 301-310, 2015.
- Malhotra V. M. (2002) "Introduction: sustainable development and concrete technology," *Concr. Int.*, vol. 24, no. 7, 2002.
- Obonyo E. A., E. Kamseu, P. N. Lemougna, A. B. Tchamba, U. C. Melo, and C. Leonelli. (2014). "A sustainable approach for the geopolymerization of natural iron-rich aluminosilicate materials," *Sustainability*, vol. 6, no. 9, pp. 5535-5553, 2014.
- Panjaitan, P. E., & Herlina, L. (2020). Review Faktor – Faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Kuat Tekan Beton Geopolimer.
- Rizky, M., Wiswamitra, K. A., Nurtanto, D. (2022). Perbandingan Metode Pembuatan Beton Geopolimer Terhadap Sifat Mekanik dan Porositas.
- Setiawati, M., Martini S., & Nurulita R. (2022). Variasi Molaritas NaOH dan Alkali Aaktivator Beton Geopolimer. *Jurnal Deformasi Vol. 7 No. 1*.
- Shahedan N. F. et al. (2019). "Thermal Insulation Properties of Insulated Concrete," *Rev. Chim*, vol. 70, pp. 3027-3031, 2019.