



# PENGARUH KADAR AKTIVATOR 0,53 DAN RASIO SS/SH (0,5-1,5) PADA BETON GEOPOLIMER DENGAN BAHAN DASAR FLY ASH TERHADAP KUAT TEKAN

## *THE EFFECT OF ACTIVATOR CONTENT 0,53 AND SS/SH RATIO (0,5-1,5) IN FLY ASH BASED GEOPOLYMER CONCRETE ON COMPRESSIVE STRENGTH*

Agus Setiya Budi<sup>1</sup>, Ivan Dwi Hermawan<sup>2</sup>, dan Wibowo<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta

### Abstrak

Beton geopolimer merupakan varian beton yang reaksi pengikatannya tidak seperti beton konvensional yang menggunakan reaksi hidrasi melainkan reaksi polimerisasi. Beton ini mengaplikasikan *fly ash* (abu terbang) sebagai bahan pengikatnya dan menggunakan aktivator untuk meningkatkan reaksi polimerisasi yang terjadi serta membantu dalam pencampuran *fly ash*, pasir, dan kerikil. Aktivator yang dipakai pada penelitian ini adalah menggunakan cairan NaOH atau sodium hidroksida (SH) dan cairan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> atau sodium silikat (SS). Bahan-bahan kimia ini bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dari beton, meningkatkan ketahanan lingkungan, dan pengurangan emisi karbon. Kajian ini menerapkan metode eksperimen kuantitatif yang dilakukan di laboratorium, dengan sampel uji berbentuk silinder dengan dimensi 15 cm x 15 cm x 30 cm. Rasio alkali aktivator yang digunakan adalah 0,53 dengan variasi SS/SH sebesar 0,5; 1,0; dan 1,5. Sampel-sampel ini akan diuji setelah benda uji berusia 28 hari. Pengujian dilakukan untuk menentukan nilai kuat tekan pada sampel beton dengan variasi rasio SS/SH dari 0,5 hingga 1,5. Hasil pengujian setelah 28 hari menunjukkan kuat tekan dengan variasi SS/SH 0,5; 1,0; dan 1,5 berturut-turut sebesar 30,48 MPa, 32,06 MPa, dan 35,90 MPa. Berdasarkan pengujian kuat tekan ditemukan bahwa rasio SS/SH yang memberikan hasil terbaik adalah 1,5, dengan kuat tekan 35,90 MPa.

**Kata Kunci:** beton geopolimer, *fly ash*, alkali aktivator, kuat tekan.

### Abstract

*Geopolymer concrete is a variant of concrete whose binding reaction is not like conventional concrete that uses a hydration reaction but a polymerization reaction. This concrete uses fly ash as the binder material and uses activators to enhance the polymerization reaction that occurs and helps in mixing fly ash, sand, and gravel. The activator used in this research is using NaOH liquid or sodium hydroxide (SH) and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> liquid or sodium silicate (SS). These chemicals aim to increase the strength of concrete, improve environmental resistance, and reduce carbon emissions. This research used a quantitative experimental method conducted in the laboratory, with a cylindrical test sample with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm. The alkaline activator ratio used was 0.53 with SS/SH variations of 0.5; 1.0; and 1.5. These samples will be tested after reaching 28 days of age. Tests were conducted to determine the compressive strength values of geopolymer concrete with varying SS/SH ratios from 0.5 to 1.5. The test results after 28 days showed the compressive strength with SS/SH variations of 0.5; 1.0; and 1.5 were 30.48 MPa, 32.06 MPa, and 35.90 MPa. Based on the compressive strength, it was found that the SS/SH ratio that gave the best results was 1.5, with a compressive strength of 35.90 MPa.*

**Keywords:** *geopolymer concrete, fly ash, alkali activator, compressive strength.*

## PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur di Indonesia terus mengalami perkembangan seiring dengan kemajuan zaman. Perkembangan infrastruktur ini sejalan dengan perkembangan teknologi beton yang terus berkembang sesuai dengan permasalahan yang ada.

Beton memiliki sifat berupa kuat tekan yang relatif tinggi, fleksibilitas dalam penggunaan, durabilitas yang tinggi, kemudahan dalam pemodelan, dan perawatan yang mudah dan terjangkau. Meskipun begitu, beton berasal dari bahan utama semen dan dalam produksinya menyebabkan pelepasan gas CO<sub>2</sub>

(\*)Corresponding author

Telp :  
E-mail :

<http://doi.org/10.33506/rb.v10i2.3593>

Received 27 Juli 2024; Accepted 07 Oktober 2024; Available online 31 Oktober 2024  
E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928

dengan jumlah yang sebanding dengan volume semen yang dihasilkan (Setiawati, dkk., 2022), hal ini menjadikan semen sebagai salah satu kontributor terbesar emisi karbon di dunia. Oleh karena itu, salah satu jenis beton alternatif yang akan diangkat adalah beton geopolimer, di mana dalam pembuatannya mengganti sepenuhnya semen dengan menggunakan bahan yang memiliki karakteristik serupa dengan semen.

**TINJAUAN PUSTAKA**

Beton geopolimer merupakan varian beton yang reaksi pengikatannya tidak seperti beton konvensional yang menggunakan reaksi hidrasi melainkan reaksi polimerisasi. Dalam perbedaannya beton konvensional memanfaatkan semen portland sebagai bahan perekat, sedangkan beton geopolimer melibatkan reaksi kimia dengan aktivator, dan umumnya menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen. Dengan pemanfaatannya itu menjadikan beton geopolimer tidak hanya mengurangi limbah tetapi dapat mengurangi proses produksi semen.

Abu terbang adalah salah satu material yang digunakan dalam pembuatan beton geopolimer karena mengandung unsur kimia Si dan Al (Salain, dkk., 2021). Akan tetapi pengaruh dari *fly ash* tergantung dari jenis *fly ash*, kandungan mineral, dan formula campuran beton terhadap sifat-sifat beton. Dalam proses geopolimerisasi, untuk memicu silikon dan aluminium dalam abu terbang dibutuhkan aktivator yang tepat agar kedua unsur tersebut larut sepenuhnya dan membentuk komposit yang sangat padat, karena itu faktor utama pada proses geopolimerisasi adalah konsentrasi aktivator (Guo *et al.*, 2010).

Pada penelitian ini aktivator yang diaplikasikan yaitu menggunakan cairan NaOH atau sodium hidroksida (SH) dan cairan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> atau sodium silikat (SS). Penggunaan NaOH sebagai aktivator dilakukan karena Si adalah zat yang sangat reaktif terhadap basa kuat. Oleh karena itu, penambahan NaOH pada abu terbang dapat memicu reaksi dengan Si (Triwulan, dkk., 2007). Sementara itu, penggunaan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> berfungsi untuk menambah pasokan Si sehingga semakin banyak reaksi polimerisasi yang terjadi (Budiningrum, dkk., 2021). Proses polimerisasi dalam beton geopolimer melibatkan reaksi kimia antara alkali (NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) dan Si-Al, menghasilkan ikatan yang disebut sebagai '*poly (sialate)*' menurut Davidovits (1991). *Sialate* adalah kependekan dari *silico-oxo-aluminate*.

Kekuatan utama beton terletak pada kemampuannya untuk menahan tekanan, sehingga hal penting yang memengaruhi kualitas beton adalah

kuat tekan beton. Kuat tekan beton ini yang menjadi parameter penting dalam mengevaluasi kualitas dan kinerja beton. Satuan dari kuat tekanan sendiri umumnya menggunakan satuan megapascal (MPa).

**METODE**

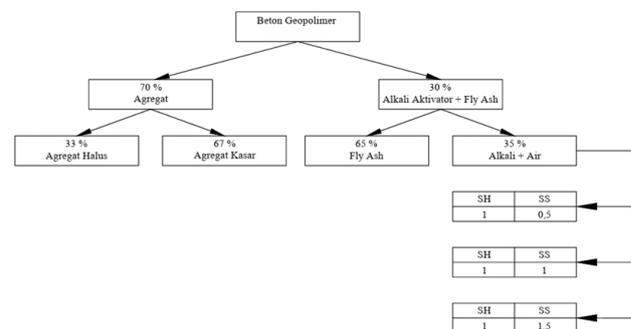
Penelitian ini mencakup dua jenis variabel, yaitu variabel tetap dan variabel bebas. Variabel bebasnya adalah penggunaan variasi SS/SH dalam kadar aktivator 35% (alkali + air) : 65% fly ash (0,5, 1, 1,5) terhadap berat beton geopolimer. Sementara itu, variabel terikat pada penelitian yaitu kuat tekan saat umur 28 hari. Penelitian ini menggunakan silinder beton dengan dimensi 15 cm x 15 cm x 30 cm sebagai benda uji. Informasi lengkap mengenai jumlah dan kode benda uji dapat ditemukan pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Jumlah dan Kode Benda Uji Beton Geopolimer

No.	Kadar Aktivator	SS/SH	Kode Benda Uji	Umur	Jumlah Sampel
1	0,53 (35%)	0,5	0,53GPC-0,5	28 hari	5
2	Alkali: 65%	1,0	0,53GPC-1,0	28 hari	5
3	<i>Fly Ash</i> )	1,5	0,53GPC-1,5	28 hari	5
Total Sampel					15

**Mix Design Beton Geopolimer**

Sebelum memulai proses pembuatan benda uji beton geopolimer, diperlukan perancangan campuran (*mix design*). Formulasi campuran yang dipakai pada kajian ini mengikuti hasil trial/prapenelitian, dengan mempertimbangkan penelitian-penelitian sebelumnya. Referensi *mix design* yang kami gunakan didasarkan pada penelitian oleh Ekaputri & Triwulan (2013). Penelitian tersebut menggunakan perbandingan 70% agregat dan 30% binder, dengan rasio 2:1 antara *split* dan pasir. Komposisi *mix design* geopolimer pada kajian ini dapat diamati pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** *Mix Design* Beton Geopolimer

**Pengujian Bahan Penyusun Beton Geopolimer**

Pengujian material penyusun beton penting dilakukan untuk mengevaluasi kualitas material yang diterapkan. Dengan memastikan bahwa kualitas bahan dasar memenuhi standar, kualitas

beton geopolimer yang dihasilkan dapat dijamin optimal. Pengujian bahan dasar melibatkan evaluasi agregat halus, agregat kasar, dan *fly ash*. Pengujian agregat halus terdiri dari pengujian gradasi, *specific gravity*, kandungan lumpur, dan kandungan zat organik dari agregat tersebut. Pengujian agregat kasar yang diterapkan mencakup pengujian gradasi, abrasi, dan *specific gravity*. Pengujian yang dilakukan pada *fly ash* yaitu Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang dilakukan untuk menganalisis persentase unsur kimia yang terdapat didalamnya.

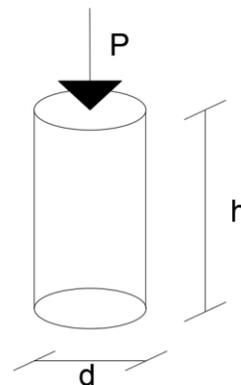
**Pengujian Beton Segar**

Pengujian workabilitas beton dilaksanakan melalui metode *slump test* tegak. Dimana penurunan tinggi beton yang dialirkan dari cetakan diukur. Teknik ini digunakan untuk memantau homogenitas dan kelecakan campuran beton segar dengan kekentalan tertentu, yang dinyatakan dengan nilai *slump*. Prosedur pengujian ini mengacu pada standar SNI 03-1972-1990 mengenai "Metode Pengujian *Slump* Beton"

**Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer**

Pengujian kekuatan beton padat pada beton geopolimer dilakukan melalui uji tekan. Uji tekan ini dilaksanakan pada benda uji yang telah berusia 28 hari. Tujuan dari uji tekan adalah untuk mengetahui seberapa besar kapasitas beton pada saat menahan tekanan per satuan luas. Pengujian kuat tekan menggunakan Mesin Uji Tekan (CTM) yang dapat dilakukan di laboratorium. Sampel beton yang umumnya digunakan yaitu silinder dengan dimensi 15cm x 15cm x 30 cm seperti **Gambar 2** dibawah karena memiliki volume yang cukup untuk menyerap beban tekan dengan baik, memungkinkan pengukuran yang lebih presisi dan akurat terhadap

kuat tekan beton. Formula yang diterapkan untuk menghitung nilai kekuatan tekan beton adalah:



**Gambar 2.** Ilustrasi Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Keterangan :

$f'c$  = Nilai kuat tekan (Mpa)

$P$  = *Load* maksimum (N)

$A$  = Luas permukaan sampel beton (mm<sup>2</sup>)

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Hasil Pengujian Bahan Penyusun Beton**

Pengujian material pembentuk beton geopolimer mengikuti berbagai standar dan persyaratan yang telah ditetapkan. Analisis terhadap data hasil pengolahan akan dipaparkan pada bagian ini. Hasil rekapitulasi pengujian bahan penyusun beton geopolimer dapat diamati pada **Tabel 2.** dan **Tabel 3.**

**Tabel 2.** Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat Halus

No.	Jenis Pengujian	Standarisasi	Hasil Pengujian	Spesifikasi
1.	<i>Absorbsion</i>		1,94	
2.	<i>Apparent Specific Grafity</i>		2,64	
3.	<i>Bulk Specific Gravity</i>		2,51	
4.	<i>Bulk Specific Gravity SSD</i>	ASTM C.127	2,56	2,5-2,7
5.	Kandungan Lumpur	ASTM C 142	4,20%	<5%
6.	Kandungan Zat Organik	ASTM C 40-92	Kuning Muda	Kuning Muda
7.	Modulus Kehalusan	ASTM C 136	2,7	1,5<MH<3,8

**Tabel 3.** Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat Kasar

No.	Jenis Pengujian	Standarisasi	Hasil Pengujian	Spesifikasi
1.	Abrasi	ASTM C.128	27,64	Maks. 40%
2.	<i>Absorbsion</i>	ASTM C.131	2,15	Maks. 3%
3.	<i>Apparent Specific Grafity</i>		2,64	
4.	<i>Bulk Specific Gravity</i>		2,49	
5.	<i>Bulk Specific Gravity SSD</i>	ASTM C.127	2,55	2,5-2,7
6.	Modulus Kehalusan	ASTM C 33	7,9	6<MH<7,1

Berdasarkan hasil pengujian XRF pada pengujian abu terbang ditemukan bahwa Kadar CaO : 7,26% dan Kadar SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 77,65% dapat disimpulkan bahwa parameter-parameter yang terkandung didalamnya abu terbang tersebut termasuk kedalam abu terbang tipe F. Abu terbang tipe F ini sangat baik untuk beton geopolimer dibandingkan tipe C, hal ini dikarenakan abu terbang tipe F memiliki kandungan silika dan alumina yang lebih tinggi dibandingkan tipe C.

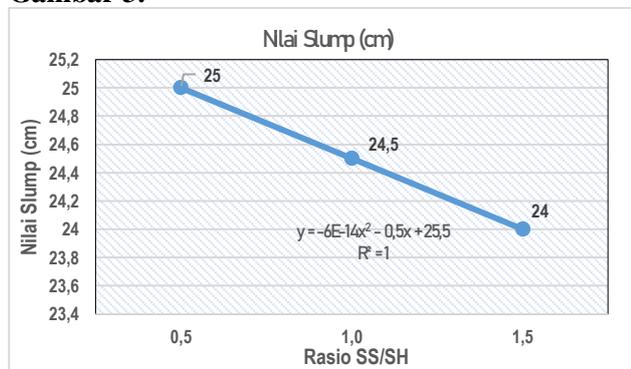
### Hasil Pengujian dan Analisis Data Workability Beton Geopolimer

Data *slump test* beton geopolimer dapat diamati pada **Tabel 4.**

**Tabel 4.** Rekapitulasi Hasil Pengujian *Slump* pada Beton Segar Geopolimer

No.	Kode Sampel	Rasio SS/SH	Nilai <i>Slump</i> (cm)
1.	0,53GPC-0,5	0,5	25
2.	0,53GPC-1,0	1,0	24,5
3.	0,53GPC-1,5	1,5	24

Berdasarkan **Tabel 4**, dapat dibuat grafik korelasi antara *output* pengecekan *slump* tegak dengan perpaduan dari rasio SS/SH yang dapat dilihat pada **Gambar 3.**



**Gambar 3.** Grafik korelasi antara *output* pengecekan *slump* tegak dengan perpaduan dari rasio SS/SH

Berdasarkan **Tabel 4.** dan grafik dari **Gambar 3.** diketahui bahwa semakin besar rasio SS/SH maka nilai dari *slump* tegak semakin turun. Hal ini dikarenakan kandungan dari Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> (Sodium Silikat) semakin meningkat apabila rasionya semakin tinggi. Kandungan air pada Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> lebih sedikit dari pada kandungan air pada larutan NaOH 10 M (Sodium Hidroksida) hal ini diketahui dari viskositas dari Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> yang lebih tinggi dari pada viskositas dari NaOH. Dapat diketahui bahwa kandungan air yang semakin sedikit maka nilai dari *slump* tegak beton akan semakin rendah. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi rasio SS/SH maka tingkat kekentalan dari beton segar juga akan semakin tinggi karena kandungan air semakin sedikit. Hal ini berpengaruh pada tingkat *workability* beton yang semakin menurun karena proses pengadukan, pengangkutan, penuangan, dan pemadatan akan semakin susah untuk dikerjakan.

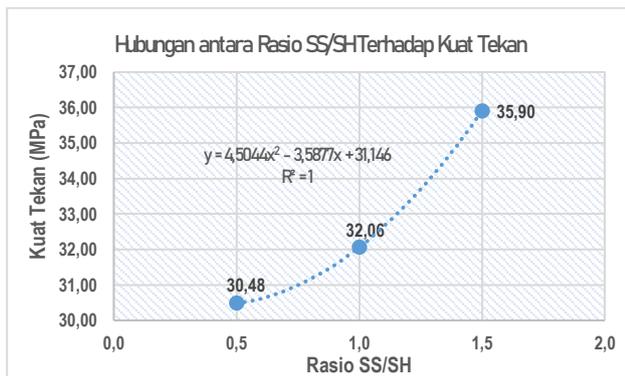
### Hasil Pengujian dan Analisis Data Kuat Tekan Beton Geopolimer

Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret dengan memanfaatkan alat *Compression Testing Machine* (CTM) digital. Pengujian kuat tekan ini dilaksanakan ketika umur beton telah mencapai umur 28 hari. Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan kadar aktivator sebesar 0,53 dan rasio SS/SH (0,5 – 1,5) dapat diamati pada **Tabel 5.**

**Tabel 4.** Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan pada Beton Segar Geopolimer

Benda Uji	Kode Sampel	P (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
0,53GPC-0,5	(1)	436	24,67	30,48
	(2)	465	26,31	
	(3)	513	29,03	
	(4)	613	34,69	
	(5)	666	37,69	
0,53GPC-1,0	(1)	436	24,67	32,06
	(2)	465	26,31	
	(3)	513	29,03	
	(4)	613	34,69	
	(5)	666	37,69	
0,53GPC-1,5	(1)	436	24,67	35,90
	(2)	465	26,31	
	(3)	513	29,03	
	(4)	613	34,69	
	(5)	666	37,69	

Berdasarkan *output* pengujian, kuat tekan semua sampel beton geopolimer dengan beragam rasio SS/SH melebihi 21 MPa. Ketika beton sudah mencapai umur 28 hari. Sejalan dengan SNI 2847:2019, seluruh sampel tersebut memenuhi syarat sebagai beton normal yang digunakan dalam Sistem Rangka Remikul Momen Khusus (SRPMK) dan dinding struktural khusus. Peningkatan rasio SS/SH mempengaruhi kuat tekan sampel beton, dengan nilai maksimum tercapai ketika rasio SS/SH 1,5 yaitu sebesar 35,90 MPa. Grafik pengaruh rasio SS/SH terhadap kuat tekan sampel beton ditampilkan pada **Gambar 4**.



**Gambar 4.** Grafik pengaruh rasio SS/SH terhadap kuat tekan beton geopolimer

Berdasarkan grafik yang ditampilkan diatas yaitu pada **Gambar 4**, dapat dipahami bahwasanya semakin besar rasio SS/SH maka dihasilkan kuat tekan yang semakin besar pula. Hal ini berhubungan dengan pengujian *workability* sebelumnya bahwa semakin tinggi rasio SS/SH maka kandungan air didalamnya akan semakin sedikit karena kandungan NaOH yang semakin rendah. Air yang terdapat didalam benda uji bakal menguap ketika proses *curing* dilakukan. Kandungan air yang berlebih pada campuran beton mengakibatkan terbentuknya pori beton karena ketika air menguap maka akan meninggalkan rongga yang sebelumnya terisi oleh air. Hal ini mengakibatkan beton menjadi tidak padat dan berakibat kepada menurunnya kualitas beton. Sehingga apabila kandungan air didalam beton lebih rendah maka pori yang tercipta juga sedikit, maka dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai rasio SS/SH maka akan berbanding lurus dengan kenaikan kuat tekan beton. Hal ini sesuai dengan kajian yang dilaksanakan Rizky, Wiswamitra, & Nurtanto, (2022) bahwa besarnya kuat tarik belah dan kuat tekan berbanding terbalik dengan besarnya nilai porositas. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Lian C *et al* (2011) bahwa ada hubungan antara nilai porositas dan kuat tekan

beton, di mana semakin rendah nilai porositas, semakin tinggi kuat tekan beton.

Penelitian ini menunjukkan bahwa rasio SS/SH memberikan pengaruh terhadap kuat tekan benda uji. Semakin tinggi rasio SS/SH yang diaplikasikan *mix design* maka akan memperbesar kuat tekan benda uji. Hal ini diperlukan oleh penelitian yang dilakukan (Honny dkk. 2019) yang mengatakan semakin besar komparasi aktivator (larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ : NaOH) dari 0.66 sampai 2.5 akan memberikan kuat tekan yang lebih besar, namun waktu yang diperlukan setelah pencampuran beton sampai beton mulai mengeras akan semakin cepat dan *slump flow* diameter akan semakin kecil. Pada rasio SS/SH 0,5 ke rasio SS/SH 1,0 terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 4,94%. Sedangkan pada rasio SS/SH 1,0 ke rasio SS/SH 1,5 terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 10,68%

## KESIMPULAN

Menurut hasil evaluasi, analisis data, dan pembahasan yang telah dilaksanakan terhadap kajian *workability* dan kuat tekan pada beton geopolimer dengan kadar aktivator 0,53 dan Rasio SS/SH (0,5 – 1,5) dengan metode *curing* suhu ruang, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. *Workability* pada beton geopolimer mengalami penurunan seiring meningkatnya rasio SS/SH pada aktivator. Hasil kajian memberikan nilai *slump* untuk beton geopolimer dengan variasi rasio SS/SH 0,5; 1,5; dan 1,5 masing-masing adalah 25 cm, 24,5 cm, dan 24 cm.
2. Kuat tekan pada beton geopolimer mengalami kenaikan seiring meningkatnya rasio SS/SH pada aktivator. Hasil penelitian menunjukkan nilai kuat tekan untuk beton geopolimer dengan variasi rasio SS/SH 0,5; 1,5; dan 1,5 masing-masing adalah 30,48 MPa, 32,06 MPa, dan 35,90 MPa pada sampel uji silinder dengan dimensi 15 cm x 15 cm x 30 cm. Kuat tekan maksimum terjadi pada variasi rasio SS/SH 1,5 dengan kuat tekan 35,90 MPa.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak syukur atas selesainya penelitian ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada orang tua, dosen pembimbing, serta rekan-rekan atas segala bantuan, motivasi, dan doa sehingga penulis bisa menuntaskan penelitian ini.

## REFERENSI

Badan Standardisasi Nasional. (1990). *SNI 03-1972-1990: Metode Pengujian Slump Beton*

- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *SNI 1974:2011: Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 2847:2019: Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*.
- Budiningrum, D. S., Kustirini, A., Purnijanto, B., Mahakusuma, 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.
- 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.
- Guo, X., Shi, H., & Dick, W. A. (2010). Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolimer. *Cement and Concrete Composites*, 32(2), 142-147, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.11.003>
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia*, 11.
- Honny, M. B., Thiofilus, J. W., Hardjito, D., & Antoni. (2019). Pengaruh Metode Pembuatan dan Komposisi Alkali Activator Terhadap Karakteristik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Tipe C.
- Lian, C., Zhuge, Y., & Beecham, S. (2011). *The relationship between porosity and strength for porous concrete. Construction and Building Materials*. School of Natural and Built Environments, University of South Australia, Adelaide, South Australia, Australia.
- Neville, A.M. and Brooks, J.J. (2010) *Concrete Technology. 2nd Edition*, Pearson Education Ltd., London.
- Panjaitan, P. E., & Herliana, L. (2020). Review Faktor - Faktor Yang Mempengaruhi Karakteristik . *Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 65-79.
- Rizky, M., Wiswamitra, K. A., & Nurtanto, D. (2022). Perbandingan Metode Pembuatan Beton Geopolymer Terhadap Sifat Mekanik dan Porositas . *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, 136-147.
- Salain, I. M. A., Wiryasa, M. N. A., & Pamungkas, I. N. M. (2020). Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Abu Terbang. *Jurnal Spektran*, 105-114.
- Setiawati, M., Martini, R. S., & Nurulita, R. (2022). Variasi Molaritas NaOH dan Alkali Aktivator Beton Geopolimer . *Jurnal Deformasi*, 56-64.
- Suhendra, R. A., & Amalia, K. R. (2021). Hubungan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kuat Tekan Beton . *Jurnal Talenta Sipil*, 225-235.
- Sulistiyorini, D., Galuh, D. L., Prayogi, Y. O., Ardiansyah, M. T., & Hakim, A. R. (2023). Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 dan 2,5. *Bangun Rekaprima*, 106-114.
- Triwulan, Ekaputri, J. J., & Adiningtyas, T. (2007). *Analisis Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dan Lumpur Porong Kering Sebagai Pengisi*. Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil, No.3
- Ulya, M., Zainuddin, & Santoso, T. B. (2023). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash dengan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> Sebagai Aktivator. *INTESI*, 234-243.