



PENGARUH KADAR AKTIVATOR 0,54 DAN RASIO SS/SH (2,0-3,0) PADA BETON GEOPOLIMER DENGAN BAHAN DASAR FLY ASH TERHADAP KUAT TEKAN

THE EFFECT OF ACTIVATOR CONTENT 0,54 AND SS/SH RATIO (2,0-3,0) IN FLY ASH-BASED GEOPOLYMER CONCRETE ON COMPRESSIVE STRENGTH

Agus Setiya Budi^{1*}, Rafli Priya Pamungkas², dan Wibowo³

(1,2,3) Program Studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta

Abstrak

Beton geopolimer merupakan beton yang menggantikan 100% semen dengan bahan ramah lingkungan. Beton geopolimer mempunyai reaksi pengikatan yang berbeda dengan beton konvensional yakni reaksi polimerisasi. Bahan ramah lingkungan yang digunakan pada beton geopolimer yaitu hasil samping pembakaran batu bara yang bernama *fly ash*. *Fly ash* membutuhkan bahan kimia aktivator untuk mengaktifkan reaksi polimerisasi yang dapat membentuk beton geopolimer. Reaksi antara *fly ash* dan bahan kimia aktivator dapat membentuk material yang memiliki sifat seperti semen. Bahan-bahan kimia yang dapat digunakan sebagai aktivator pada reaksi polimerisasi dalam *fly ash* adalah menggunakan kombinasi alkali silikat dengan alkali hidroksida atau biasa disebut Natrium Silikat (SS) dan Natrium Hidroksida (SH). Penelitian beton geopolimer ini dilakukan di laboratorium dengan metode eksperimen. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan tinggi dan diameter sebesar 30 cm dan 15 cm. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan besarnya kuat tekan beton geopolimer dengan variasi kadar aktivator 0,54 dan rasio natrium silikat dan natrium hidroksida sebesar 2,0; 2,5; dan 3,0 pada beton berumur 28 hari dan curing suhu ruang. Hasil pengujian kuat tekan diperoleh bahwa variasi rasio SS/SH 2,0; 2,5; 3,0 masing-masing sebesar 36,13 MPa, 45,63 MPa, dan 42,17 MPa. Berdasarkan hasil kuat tekan didapatkan hasil maksimum pada rasio SS/SH 2,5 sebesar 45,63 MPa.

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

Abstract

Geopolymer concrete is concrete that replaces 100% of cement with environmentally friendly materials. Geopolymer concrete has a different binding reaction compared to conventional concrete, namely the polymerization reaction. The environmentally friendly material used in geopolymer concrete is waste from coal combustion called fly ash. Fly ash requires a chemical activator to initiate the polymerization reaction that can form geopolymer concrete. The reaction between fly ash and the chemical activator can create a material with cement-like properties. The chemicals that can be used as activators in the polymerization reaction of fly ash include a combination of alkali silicate and alkali hydroxide, commonly known as Sodium Silicate (SS) and Sodium Hydroxide (SH). This geopolymer concrete research was conducted in a laboratory using experimental methods. The specimens used were cylindrical with a height of 30 cm and a diameter of 15 cm. The research aims to determine the compressive strength of geopolymer concrete with variations in activator content of 0.54 and ratios of sodium silicate to sodium hydroxide of 2.0, 2.5, and 3.0 for 28-day-old concrete cured at room temperature. The outcomes of the compressive strength tests indicated that the variations in the SS/SH ratios of 2.0, 2.5, and 3.0 resulted in compressive strengths of 36.13 MPa, 45.63 MPa, and 42.17 MPa, respectively. Based on these results, the maximum compressive strength was obtained with an SS/SH ratio of 2.5 of 45.63 MPa.

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

PENDAHULUAN

Beton adalah salah satu material konstruksi yang penggunaannya sangat tinggi dalam pembangunan infrastruktur di Indonesia. Hal itu menyebabkan penggunaan semen yang masif sebagai bahan

campur beton sehingga dapat meningkatkan emisi karbon. Pada tahun 1995 produksi semen dunia mencapai 1,5 milyar ton dan meningkat menjadi 2,2 milyar ton pada tahun 2010 (Abdullah et al., 2011). Hal tersebut tentu saja dapat mencemari dan

(*)Corresponding author

Telp :
E-mail :

<http://doi.org/10.33506/rb.v10i2.3570>

Received 23 Juli 2024; Accepted 07 Oktober 2024; Available online 31 Oktober 2024

E-ISSN: 2614-4344 P-ISSN: 2476-8928

merusak lingkungan hidup kita seperti pemanasan global dan emisi karbon. Oleh karena itu, salah satu cara mengurangi emisi karbon akibat semen adalah dengan inovasi beton ramah lingkungan.

Beton geopolimer diartikan sebagai beton ramah lingkungan yang menggantikan 100 % semen konvensional dengan bahan ramah lingkungan yang memiliki karakteristik dan kandungan yang serupa. Beton geopolimer terbentuk dari bahan dasar material yang memiliki banyak kandungan Silikon dan Alumunium (Soentpiet et al., 2018). Beton ramah lingkungan ini memakai bahan anorganik sebagai pengikat seperti alumina-silikat dari material geologi alam yang banyak mengandung silikat dan alumina (Budh & Warhade, 2014). Unsur silikat alumina tersebut banyak ditemukan pada *fly ash* yang dibutuhkan untuk menggantikan semen.

Fly ash merupakan hasil samping pembakaran batu bara pada tungku Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang berbentuk bundar, halus, dan bersifat pozzolanik (Badan Standarisasi Nasional, 2002). *Fly ash* memiliki kandungan silikat (SiO_2) sekitar 40-60 % (Saputra, 2023). Berdasarkan banyaknya limbah *fly ash* dan kandungannya, *fly ash* yang digunakan sebagai pengganti semen pada beton geopolimer dapat mengurangi limbah yang baik bagi lingkungan.

Reaksi kimia pada beton geopolimer adalah reaksi polimerisasi karena adanya reaksi antara *fly ash* dan bahan aktivator alkali. Bahan-bahan kimia aktivator yang dipakai pada umumnya untuk mengaktifkan reaksi polimerisasi dalam *fly ash* yaitu menggunakan kombinasi alkali hidroksida / Sodium Hidroksida (SH) dengan alkali silikat / Sodium Silikat (SS). Semen berfungsi sebagai pengikat pada beton sedangkan *fly ash* tidak mempunyai kemampuan tersebut. Akan tetapi, adanya air dan partikel halus menyebabkan terjadinya reaksi antara unsur silika oksida yang terkandung di dalam *fly ash* dengan SH secara kimia dan menghasilkan zat yang dapat mengikat (Hardjito, 2005).

Rasio SS/SH adalah perbandingan dari kadar Sodium Silikat (SS) dengan Sodium Hidroksida (SH) dalam berat alkali aktivator beton geopolimer. Rasio SS/SH, molaritas SS, temperatur dan waktu *curing* adalah aspek yang memengaruhi besaran kuat tekan beton geopolimer (Panjaitan & Herliana, 2020). Rasio SS/SH yang digunakan pada umumnya adalah NaOH / SH 8M sampai 16M dan Na_2SiO_3 / SS dengan jumlah 0,4 sampai 2,5 dari perbandingan dengan jumlah SH (Dewi et al., 2016). Pengaruh rasio SS/SH terhadap kuat tekan akan meningkat hingga nilai 2,5 sedangkan selebihnya akan menurun pada beton geopolimer (Ahmed et al., 2021). Kadar aktivator adalah perbandingan presentase alkali

aktivator dengan presentase fly ash dalam binder beton geopolimer. Penelitian yang dilakukan Ekaputri & Triwulan, (2013) menggunakan kadar aktivator sebesar 0,54 yaitu 35% alkali aktivator dibanding 65% fly ash.

Dari komposisi dan uraian tersebut, penelitian akan dilakukan dengan tujuan untuk menentukan pengaruh variasi kadar aktivator 0,54 dan rasio SS/SH 2,0; 2,5; dan 3,0 terhadap kuat tekan pada beton geopolimer.

TINJAUAN PUSTAKA

Beton Geopolimer

Beton geopolimer adalah salah satu beton yang memakai bahan pengikat ramah lingkungan sebagai pengganti semen konvensional. Beton geopolimer saat ini sedang mendapatkan banyak perhatian dalam penelitian. Penelitian pertama terkait beton geopolimer dilakukan oleh Joseph Davidovits (1978) yang meneliti beton geopolimer dari struktur piramida. Reaksi polimerisasi yang terjadi yaitu reaksi antara silikat-alumina oksida (Si_2O_5 dan Al_2O_2) dengan alkali polisilikat yang berupa natrium silikat akan membentuk ikatan polimer yaitu SI-O-Al (Davidovits, 1994).

Agregat

Agregat halus berdefinisi partikel mineral yang mempunyai ukuran butiran lebih kecil dari 5 mm (saringan No.4). Fungsi utama agregat halus dalam campuran beton adalah untuk mengisi ruang antara agregat kasar, yang bertujuan untuk meningkatkan ikatan antara material dalam beton. Agregat halus yang digunakan berupa pasir.

Agregat kasar merupakan bahan konstruksi yang terdiri dari butiran kasar berukuran lebih besar dari 5 mm (saringan No.4). Agregat kasar berfungsi sebagai pengisi dan memberikan kekuatan tekan yang diperlukan pada beton. Agregat kasar yang digunakan berupa batu pecah.

Fly Ash

Fly ash adalah partikel-partikel kecil yang memiliki sifat pozzolanik. Kandungan dari *fly ash* sebagian besar terdiri dari silikat dioksida (SiO_2), kalsium (CaO), alumunium (Al_2O_3), dan besi (Fe_2O_3), serta sebagian kecil terdiri dari potasium, magnesium, sodium, titanium, dan sulfur (Alim, 2020). *Fly ash* tipe F adalah jenis *fly ash* yang digunakan dalam penelitian beton geopolimer ini berasal dari PLTU Tanjung Jati B Jepara.

Alkali Aktivator

Alkali aktivator adalah zat kimia yang berfungsi untuk memicu reaksi polimerisasi pada bahan yang memiliki sifat pozzolan seperti *fly ash*. Sodium

hidroksida dalam beton geopolimer berperan untuk mereaksikan unsur-unsur Si dan Al yang terkandung dalam *fly ash*, sehingga menciptakan ikatan yang kuat. Natrium hidroksida yang digunakan dalam penelitian ini berupa larutan 10 M yang dilarutkan dari bentuk padatan. Natrium silikat pada beton geopolimer berperan untuk mempercepat proses ikatan polimerisasi dan memberikan tambahan unsur silikat.

Kuat Tekan

Uji kuat tekan beton bertujuan untuk mengukur kekuatan beton dalam menahan beban tekan per satuan luas. Pengujian ini dilakukan pada sampel beton yang berumur 28 hari. Benda uji yang umumnya digunakan yaitu berbentuk silinder dan kubus. Nilai kuat tekan dihitung dengan membagi beban maksimum yang diterima dengan luas penampang benda uji (Badan Standarisasi Nasional, 2011). Adapun perhitungan kuat tekan beton pada persamaan 1 sebagai berikut.

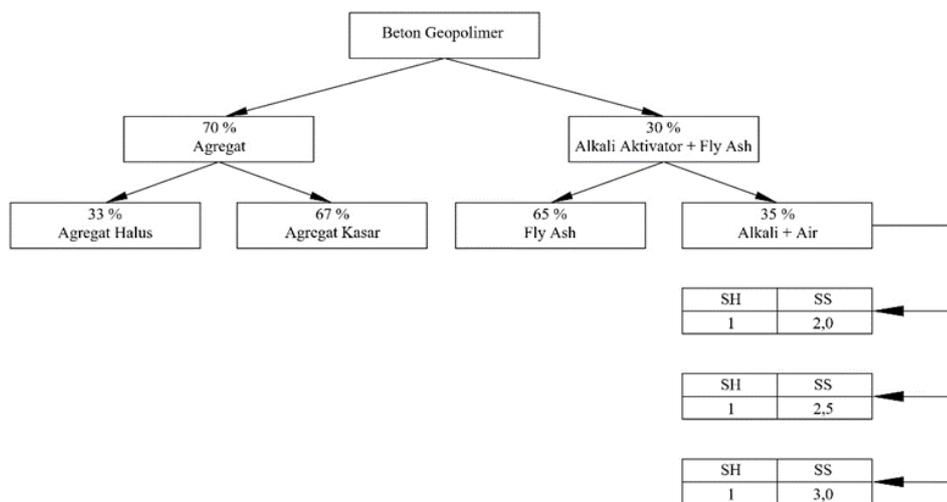
$$f'c = \frac{P}{A} \tag{1}$$

dengan,

- $f'c$ = kuat tekan (MPa)
- P = beban maksimum (N)
- A = luas permukaan benda uji (mm²)

METODE

Penelitian beton geopolimer ini menggunakan metode eksperimental, yaitu dengan mengumpulkan data primer. Tahap awal penelitian beton geopolimer ini adalah melakukan pengujian bahan penyusun yaitu pengujian agregat. Pembuatan benda uji dapat dilakukan pada saat material penyusun beton yang sudah memenuhi standar yang berlaku. Tahap selanjutnya yaitu melakukan *trial*/pra penelitian untuk mengetahui metode pencampuran dan komposisi yang optimal pada beton geopolimer. Pembuatan beton dengan beberapa *mix design* dari penelitian terdahulu terutama penelitian Ekaputri & Triwulan, (2013). Berdasarkan tahap *trial*, diambil penggunaan komposisi untuk penelitian ini dengan molaritas natrium hidroksida 10M, rasio SS/SH sebesar 2,0; 2,5; 3,0 dalam binder geopolimer 35% alkali aktivator dan 65% *fly ash*. Berikut *mix design* beton geopolimer disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Mix Design* Beton Geopolimer

Tahap selanjutnya yaitu tahap pelaksanaan dengan membuat sampel benda uji. Binder geopolimer dibuat dengan mencampurkan 65% *fly ash* dan 35% alkali aktivator terhadap berat binder dengan metode terpisah, kemudian menuangkan kedalam agregat halus dan kasar (70% dari berat beton geopolimer) yang telah tercampur pada *concrete mixer* hingga merata. Setelah tercampur rata, kemudian menuangkan beton segar kedalam wadah untuk dilakukan pengujian *slump*. Setelah uji *slump*, beton segar dimasukkan ke dalam *mould*

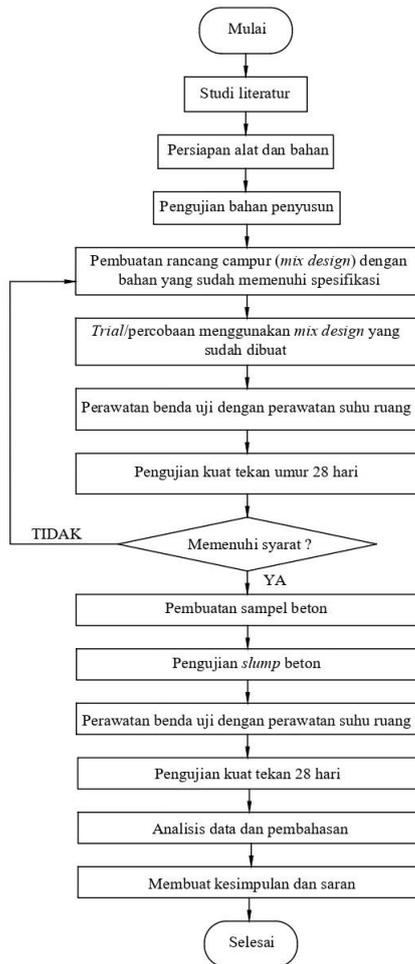
silinder dan didiamkan sebelum dilakukan pembongkaran *mould* setelah 24 jam. Tahap selanjutnya yaitu perawatan beton dengan metode *curing* suhu ruang selama 28 hari.

Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) digital yang dilaksanakan di laboratorium. Benda uji beton geopolimer berbentuk silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm berjumlah 5 benda uji setiap variasinya. Variasi dan jumlah benda uji ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Sampel Beton Geopolimer

No	Rasio SS/SH	Umur (Hari)	Jumlah Benda Uji
1	2,0	28	5
2	2,5	28	5
3	3,0	28	5
Total Benda Uji			15

Diagram alir penelitian beton geopolimer disajikan pada Gambar 2.

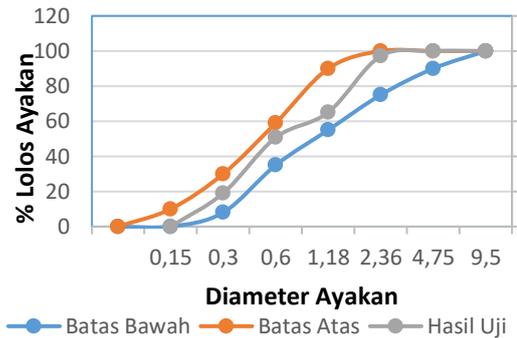


Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

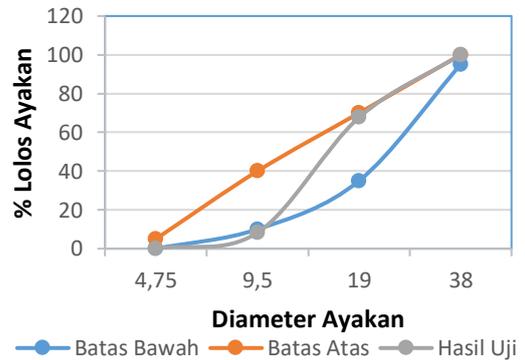
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Bahan Penyusun Beton Geopolimer

Pengujiian bahan dasar beton geopolimer berfungsi untuk mengetahui kualitas bahan yang akan digunakan. Bahan dasar yang memenuhi syarat akan menghasilkan mutu beton geopolimer yang maksimal. Pengujiian agregat halus yang meliputi pengujiian modulus kehalusan, kandungan zat organik, kandungan kadar lumpur, dan *specific gravity* disajikan pada Tabel 2. Pengujiian agregat kasar yang terdiri dari pengujiian modulus kehalusan, abrasi, dan *specific gravity* disajikan dalam Tabel 3. Grafik pengujiian gradasi agregat halus dan kasar disajikan pada Gambar 2 dan 3.



Gambar 3. Grafik Gradasi Agregat Halus



Gambar 4. Grafik Gradasi Agregat Kasar

Tabel 2. Hasil Pengujiian Agegat Halus

Pengujiian	Hasil Pengujiian	Spesifikasi	Keterangan
<i>Absorption</i>	1,94%	-	-
<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,64	-	-
<i>Bulk Spesific Gravity</i>	2,51	-	-
<i>Bulk Spesific Gravity SSD</i>	2,56	2,5 – 2,7 ASTM C.127	Memenuhi
<i>Kandungan Lumpur</i>	4,20%	<5% PBI 1971, ASTM C.117	Memenuhi
<i>Kandungan Zat Organik</i>	Kuning Muda	Kuning Muda PBI 1971, ASTM C.40	Memenuhi
<i>Modulus Kehalusan</i>	2,70	1,5 < MH < 3,8 ASTM C.136	Memenuhi

Tabel 3. Hasil Pengujian Agegat Kasar

Pengujian	Hasil Pengujian	Spesifikasi	Keterangan
Absorption	1,94%	-	-
Apparent Specific Gravity	2,64	-	-
Bulk Spesific Gravity	2,51	-	-
Bulk Specific Gravity SSD	2,56	2,5 – 2,7 ASTM C.127	Memenuhi
Abrasi	27,64%	< Maksimal 40% ASTM C.128	Memenuhi
Modulus Kehalusan	7,0	6 < MH < 7,1 ASTM C.33	Memenuhi

Pengujian *fly ash* dengan uji XRF (*X-Ray Fluorescence*) didapatkan kadar $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 76,65 % dan kadar CaO sebesar 7,26 %. Menurut ASTM C-168, hasil pengujian menunjukkan bahwa *fly ash* yang digunakan adalah tipe F.

Hasil Uji Beton Segar

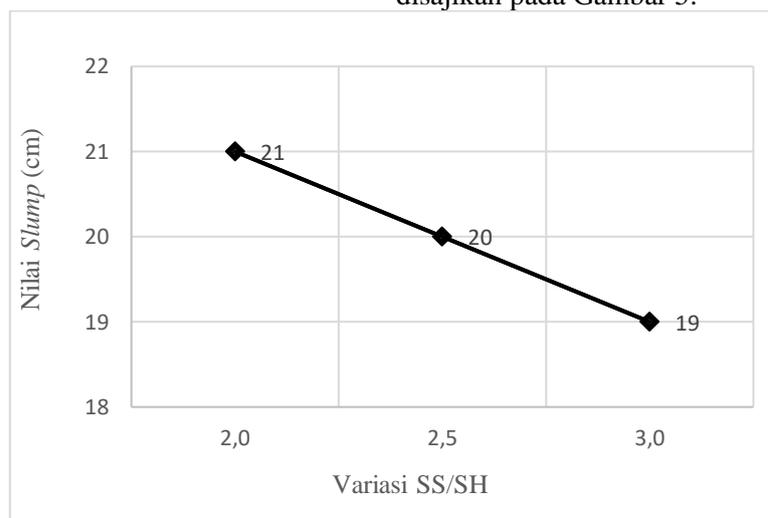
Pengujian beton segar mengacu pada standar SNI 03-1972-1990. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur penurunan tinggi beton segar dari cetakan

kerucut *abrams*. Hasil pengujian *slump* ditampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Slump*

Rasio SS/SH	Nilai <i>Slump</i> (cm)
2,0	21
2,5	20
3,0	19

Berdasarkan Tabel 4. dapat dibuat grafik pengaruh variasi SS/SH terhadap nilai *slump* yang disajikan pada Gambar 5.

**Gambar 5.** Grafik Hubungan Nilai *Slump* Beton Geopolimer Terhadap Variasi SS/SH

Hasil pengujian menunjukkan nilai *slump* tegak semakin menurun seiring dengan semakin tingginya variasi rasio SS/SH yang digunakan. Penurunan tingkat konsistensi ini disebabkan oleh kecilnya sodium hidroksida (NaOH) yang digunakan dalam campuran. Kadar air pada sodium hidroksida (NaOH) lebih tinggi dibanding dengan sodium silikat (Na_2SiO_3), hal ini menyebabkan semakin besar kadar sodium silikat (Na_2SiO_3) maka campuran beton akan semakin kental dan nilai *slump* akan semakin berkurang. Peningkatan kekentalan terjadi akibat bertambahnya sodium silikat yang menyebabkan penurunan nilai *slump* pada beton

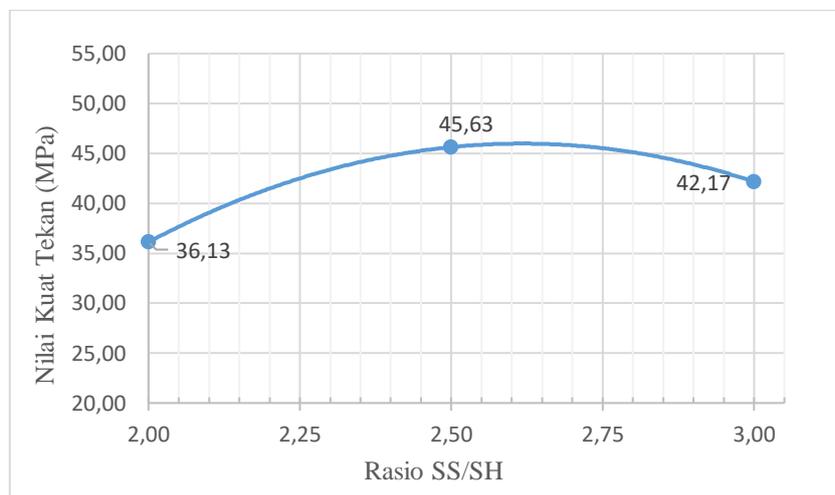
geopolimer (Topark-Ngarm et al., 2015). Dengan demikian semakin tinggi rasio SS/SH, maka akan semakin kecil tingkat penurunan pada *slump* yang berarti akan semakin sulit adukan beton untuk dikerjakan sehingga memiliki nilai *workability* yang rendah.

Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton geopolimer mengacu pada SNI 1974:2011. Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer ditampilkan pada Tabel 5 dan grafik pengaruh rasio SS/SH terhadap kuat tekan ditampilkan pada Gambar 6.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Rasio SS/SH	Kode	Load (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
2,0	(1)	710	40,18	36,13
	(2)	717	40,57	
	(3)	561	31,75	
	(4)	618	34,97	
	(5)	586	33,16	
2,5	(1)	867	49,06	45,63
	(2)	824	46,63	
	(3)	816	46,18	
	(4)	818	46,29	
	(5)	707	40,01	
3,0	(1)	718	40,63	42,17
	(2)	693	39,22	
	(3)	796	45,04	
	(4)	702	39,73	
	(5)	817	46,23	

**Gambar 6.** Grafik Hubungan Nilai Kuat Tekan Beton Geopolimer Terhadap Rasio SS/SH

Hasil kuat tekan beton geopolimer meningkat dari rasio SS/SH 2,5 kemudian menurun pada variasi SS/SH 3,0. Kuat tekan beton geopolimer pada rasio SS/SH 2,0; 2,5; dan 3,0 masing-masing sebesar 36,13 MPa; 45,63 MPa; dan 42,17 MPa. Berdasarkan hasil tersebut, kuat tekan seluruh benda uji dari rasio SS/SH yang digunakan melebihi 21 MPa dan memenuhi kriteria sebagai beton normal dengan kegunaan struktural (SNI 2847:2019).

Peningkatan kuat tekan pada rasio SS/SH 2,5 terhadap rasio SS/SH 2,0 sebesar 26,32 %. Penurunan kuat tekan pada rasio SS/SH 3,0 terhadap rasio SS/SH 2,5 sebesar 7,59 %. Penurunan kuat tekan yang terjadi akibat tingginya kadar sodium silikat dalam campuran beton. Kandungan sodium silikat yang berlebihan dalam campuran menyebabkan penurunan kekuatan tekan karena

terhambatnya pembentukan struktur geopolimer. (Cheng et al, 2003). Larutan alkali aktivator yang terlalu pekat akibat kandungan Na_2SiO_3 menyebabkan sulitnya saat pengadukan dan pengecoran yang berakibat menurunnya kuat tekan (Ekaputri et al., 2007). Penelitian ini menunjukkan bahwa rasio SS/SH memengaruhi kuat tekan beton geopolimer. Semakin besar rasio SS/SH yang digunakan pada campuran akan meningkatkan kuat tekan akan tetapi pada rasio SS/SH yang terlalu jauh akan mengalami penurunan kuat tekan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada beton geopolimer kadar aktivator 0,54 dengan variasi SS/SH 2,0 – 3,0 diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Variasi rasio SS/SH terhadap berat binder geopolimer memberikan pengaruh workability beton geopolimer. Nilai slump untuk beton geopolimer dengan variasi rasio SS/SH 2,0; 2,5; dan 3,0 masing-masing adalah 21 cm, 20 cm, dan 19 cm.
2. Penambahan rasio SS/SH dapat menurunkan nilai slump beton geopolimer yang menyebabkan memiliki workability yang rendah.
3. Variasi rasio SS/SH terhadap berat binder geopolimer memberikan pengaruh kuat tekan beton geopolimer. Nilai kuat tekan beton geopolimer maksimum terjadi pada saat rasio SS/SH 2,5 sebesar 45,63 MPa.
4. Penambahan rasio SS/SH dapat meningkatkan kuat tekan beton geopolimer akan tetapi pada rasio SS/SH yang terlalu tinggi dapat menurunkan kuat tekan beton geopolimer.

REFERENSI

- Abdullah, M. M. A., Kamarudin, H., Mohammed, H., Khairul Nizar, I., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2011). The relationship of NaOH molarity, Na₂SiO₃/NaOH ratio, fly ash/alkaline activator ratio, and curing temperature to the strength of fly ash-based geopolymer. *Advanced Materials Research*, 328–330, 1475–1482. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.1475>
- Ahmed, H. U., Mohammed, A. A., Rafiq, S., Mohammed, A. S., Mosavi, A., Sor, N. H., & Qaidi, S. M. A. (2021). Compressive strength of sustainable geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 13, Issue 24). MDPI. <https://doi.org/10.3390/su132413502>
- Alim, H. S. (2020). *Prototype komposisi beton geopolimer: Pengaruh variasi rasio aktivator pada beton geopolimer berbasis fly ash tipe dengan molaritas sodium hidroksida tinggi terhadap kuat tekan dan durabilty*. Skripsi, Teknologi Rekayasa Pengelolaan Dan Pemeliharaan Bangunan Sipil: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Badan Standardisasi Nasional. (1990). SNI 03-1972-1990: *Metode Pengujian Slump Beton*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-6414-2002: *Spesifikasi Timbangan yang Digunakan pada Pengujian Bahan*.
- 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*.
- Budh, C. D., & Warhade, N. R. (2014). Effect of molarity on compressive strength of geopolymer mortar. In *International Journal of Civil Engineering Research* (Vol. 5, Issue 1). <http://www.ripublication.com/ijcer.htm>
- Cheng, T. W., & Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205–210. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00008-6](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00008-6)
- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cement. *Alkaline Cement and Concretes*, 131-149. www.geopolymer.org
- Dewi, N. R., Dermawan, D., & Ashari, M. L. (2016). Studi pemanfaatan limbah B3 karbit dan fly ash sebagai bahan campuran beton siap pakai (BSP) (Studi Kasus : PT Varia Usaha Beton).. *Jurnal Presipitasi : Media Komunikasi Dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 13(1), 34. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v13i1.34-43>
- Ekaputri, J. J., & Triwulan. (2013). Sodium sebagai aktivator fly Ash, trass dan lumpur sidarjo dalam Beton Geopolimer . *Jurnal Teknik Sipil* , 1-10.
- Ekaputri, J. J., Triwulan, & Damayanti, O., (2007). Sifat mekanik beton geopolimer berbahan dasar fly ash jawa power paiton sebagai material alternatif. *Jurnal Pondasi* , Vol 13.
- Hardjito, D. (2005). Studies on fly ash-based geopolymer concrete. Curtin University of Technology.
- Panjaitan, P. E., & Herliana, L. (2020). Review faktor - faktor yang mempengaruhi karakteristik kuat tekan beton geopolimer. *Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 65-79.
- Soentpiet, B. J., Wallah, S. E., & Manalip, H. (2018). Modulus elastisitas beton geopolymer berbasis fly ash dari PLTU Amurang. *Jurnal Sipil Statik*, 6(7), 517–526.
- Saputra, I. F., (2023). *Kajian karbonasi dan serapan CO₂ pada beton bubuk reaktif dengan silica fume 15%, pasir kuarsa 30%, dan variasi komposisi fly ash sebagai bahan pengganti parsial semen*. Skripsi, Universitas Sebelas Maret.
- Topark-Ngarm, P., Chindaprasirt, P., Sata, V. (2015). Setting time, strength, and bond of high-calcium fly ash geopolymer concrete. University Of North Dakota.