

STUDI EXPERIMENTAL KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH DENGAN Na_2SO_4 DAN Na_2SiO_3 SEBAGAI AKTIVATOR

Ma'rifatul Ulya¹, Zainuddin², Toni Budi Santoso³

^{1,2,3} Universitas Bojonegoro, Jl. Lettu Suyitno no.2 Bojonegoro.
marifatululya44@gmail.com

ABSTRAK

Pembangunan infrastruktur di Indonesia mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Hal tersebut menyebabkan kebutuhan akan beton meningkat. Kebutuhan beton yang meningkat menyebabkan produksi semen juga meningkat, akibatnya emisi gas karbondioksida (CO_2) semakin tinggi. Hal tersebut dapat merusak lingkungan hidup diantaranya menyebabkan pemanasan global. Salah satu inovasi yang dapat dilakukan adalah dengan memproduksi beton geopolimer yang merupakan beton yang tidak menggunakan semen sebagai bahan dasar, tetapi menggunakan bahan pozzolan contohnya fly ash. Pembuatan binder geopolimer umumnya menggunakan metode pencampuran basah, yaitu menggunakan bahan pozzolan dan larutan alkali aktivator dengan komposisi perbandingan molaritas kimia tertentu. Larutan alkali berfungsi sebagai pengaktif reaksi polimerisasi dari unsur Al dan Si pada fly ash. Pada penelitian ini digunakan Na_2SO_4 dan Na_2SiO_3 sebagai aktivatornya. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash dengan Na_2SO_4 dan Na_2SiO_3 sebagai aktivator pada umur 7 hari dan 28 hari dan juga mendapatkan variasi optimum penggunaan fly ash dengan aktivator Na_2SO_4 dan Na_2SiO_3 pada beton geopolimer. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan membuat benda uji beton geopolimer berbentuk silinder dengan ukuran 10 x 20 cm dan akan dilakukan pengujian kuat tekan pada umur 7 dan 28 hari. Berdasarkan hasil uji yang dilakukan, nilai rata-rata kuat tekan beton dengan umur 7 hari pada variasi 4 M sebesar 0.932 MPa, sedangkan variasi 6 M sebesar 11.934 MPa, dan variasi 8 M sebesar 6.274 MPa. Sedangkan nilai rata-rata kuat tekan beton dengan umur 28 hari pada variasi 4 M sebesar 4.951 MPa, sedangkan variasi 6 M sebesar 40.185 MPa, dan variasi 8 M sebesar 27.099 MPa. Variasi optimum berada pada beton geopolimer dengan konsentrasi molaritas 6 M pada umur 28 hari dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 40.185 MPa.

Kata Kunci : Alkali Aktivator, Beton Geopolimer, Fly Ash, Kuat tekan

ABSTRACT

Infrastructure development in Indonesia has increased over the years. As a result, the demand for concrete is increasing. As the need for concrete increases, cement production also increases, resulting in higher carbon dioxide (CO_2) emissions. This can damage the environment, including causing global warming. One innovation that can be done is the production of geopolymer concrete, which is concrete that does not use cement as a base material, but uses pozzolanic materials, such as fly ash. The production of geopolymeric binders generally uses a wet-mix process, using pozzolanic materials and alkaline activator solutions with a specific chemical molarity ratio composition. The alkaline solution acts as an activator for the polymerization reaction of the Al and Si elements in fly ash. In this study, Na_2SO_4 and Na_2SiO_3 were used as activators. This research aims to obtain the compressive strength value of fly ash-based geopolymer concrete with Na_2SO_4 and Na_2SiO_3 as activators at the age of 7 days and 28 days and also to obtain the optimum variation of fly ash use with Na_2SO_4 and Na_2SiO_3 activators in geopolymer concrete. This research uses an experimental method by making cylindrical geopolymer concrete specimens with a size of 10 x 20 cm, which will be tested for compressive strength at the age of 7 days and 28 days. Based on the results of the tests conducted, the average value of concrete compressive strength at the age of 7 days in the 4 M variation is 0.932 MPa, while the 6 M variation is 11.934 MPa, and the 8 M variation is 6.274 MPa. While the average value of concrete compressive strength with 28 days of age in the 4 M variation is 4.951 MPa, while the 6 M variation is 40.185 MPa, and the 8 M variation is 27.099 MPa. The optimum variation

is in geopolymer concrete with a molarity concentration of 6 M at the age of 28 days with an average compressive strength value of 40.185 MPa.

Keywords: Alkali Activator, Geopolymer Concrete, Fly Ash, Compressive Strength

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Dilihat dari web resmi LPSE Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, pada tahun 2010 – tahun 2022 terdapat sebanyak 63.640 proyek. Karena pembangunan infrastruktur yang terus meningkat setiap tahunnya, menyebabkan kebutuhan akan beton pun meningkat (Suprpto et al., 2023). Beton merupakan salah satu material struktural yang umum digunakan dalam suatu struktur bangunan. Beton adalah sebuah bahan bangunan komposit yang terbuat dari kombinasi agregat dan pengikat semen. Bentuk paling umum dari beton adalah beton semen portland, yang terdiri dari agregat mineral, semen, dan air (Medical, 2022). Kebutuhan beton yang meningkat menyebabkan produksi semen juga meningkat. Meningkatnya produksi semen mengakibatkan emisi gas karbondioksida (CO_2) semakin tinggi. Hal tersebut dapat merusak lingkungan hidup diantaranya menyebabkan pemanasan global (Lutfiani et al., 2022). Sehingga perlu dicarikan upaya untuk menekan angka produksi gas yang mencemari lingkungan.

Salah satu inovasi yang dapat dilakukan adalah dengan memproduksi beton geopolimer. Beton geopolimer merupakan beton yang tidak menggunakan semen sebagai bahan dasar, tetapi menggunakan bahan Pozzolan salah satunya adalah *fly ash*. *Fly ash* sendiri merupakan sisa dari hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik yang mengandung unsur Al dan Si yang sangat berperan penting dalam mempengaruhi karakteristik beton geopolimer (Santoso et al., 2021). Dibidang teknik sipil, beton geopolimer diartikan secara praktis sebagai suatu campuran beton yang terdiri dari pasta geopolimer dan agregat kasar dan halus sebagai bahan pengisi.

Binder geopolimer memiliki beberapa keunggulan, diantaranya lebih ramah lingkungan karena dalam pembuatannya tidak melepas emisi CO_2 , tingkat workabilitas yang tinggi, lebih tahan terhadap serangan kimia, dan lebih tahan terhadap temperatur tinggi. Namun pengaplikasian dalam masyarakat belum sebanyak binder semen portland, karena masih memiliki kelemahan yaitu desain campurannya melibatkan perhitungan perbandingan bahan kimia dan bahan pozzolan. Binder semen portland mudah diterima di masyarakat karena dalam pembuatannya sangatlah mudah, hanya mencampurkan air dengan semen portland dengan rasio tertentu (Santoso, 2023).

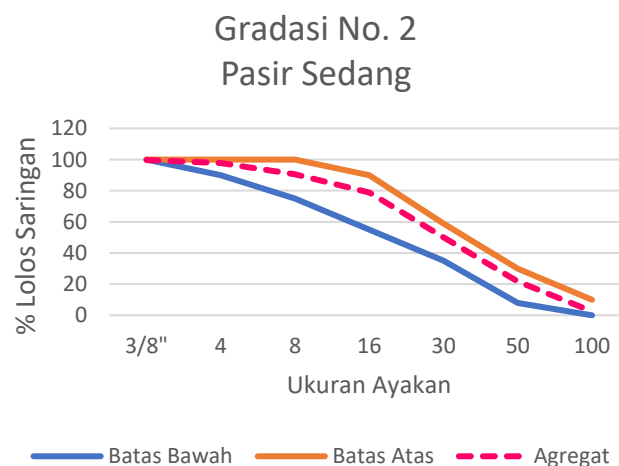
Pembuatan binder geopolimer umumnya menggunakan metode pencampuran basah, yaitu menggunakan bahan pozzolan dan larutan alkali aktivator dengan komposisi perbandingan molaritas kimia tertentu. Larutan alkali berfungsi sebagai pengaktif reaksi polimerisasi dari unsur Al dan Si pada *fly ash*. Pada penelitian ini digunakan Na_2SO_4 dan Na_2SiO_3 sebagai aktivatornya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai kuat tekan beton geopolimer dengan Na_2SO_4 dan Na_2SiO_3 sebagai aktivator dan juga untuk mengetahui berapa variasi optimumnya. Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat membantu mengurangi kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh emisi gas karbondioksida yang dihasilkan dari produksi semen.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan membuat benda uji beton geopolimer berbentuk silinder dengan ukuran 10 cm x 20 cm dan akan dilakukan pengujian kuat tekan pada umur 7 hari dan 28 hari. Pembuatan beton geopolimer pada penelitian ini dimulai dengan tahap pengumpulan bahan dan material, pemeriksaan kualitas bahan dan material, pembuatan benda uji, perawatan benda uji, penyiapan alat pengujian, dan tahap pengujian sampel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

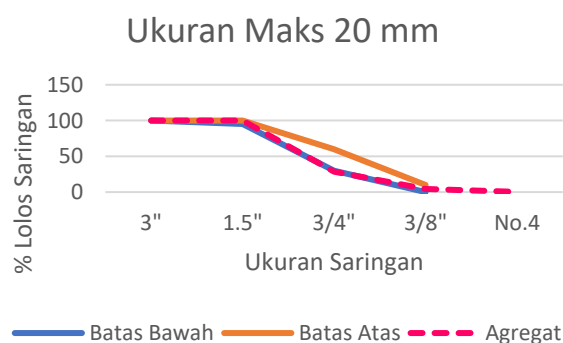
Sebelum melakukan *mix design* dan pembuatan benda uji, perlu dilakukan pengujian bahan-bahan dasar penyusun beton. Hasil dari pengujian bahan-bahan penyusun beton yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 1. Hasil Analisis Gradasi Agregat Halus

Sumber : Hasil Pengujian Peneliti di Laboratorium Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro (2023)

Pasir yang digunakan pada penelitian ini masuk ke dalam gradasi zona no. 2 dengan FM (Fine Modulus) sebesar 2.59.

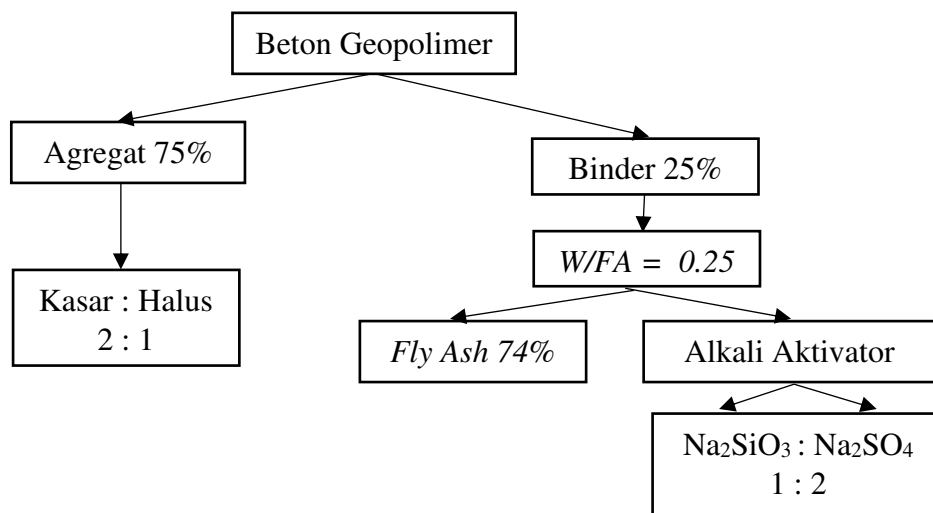


Gambar 2. Hasil Analisis Gradasi Agregat Halus

Sumber : Hasil Pengujian Peneliti di Laboratorium Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro (2023)

Dari gambar di atas, maka dapat disimpulkan bahwa agregat kasar pada penelitian ini masuk ke dalam gradasi zona max 20 mm dengan FM (Fine Modulus) sebesar 2.67.

Setelah melakukan uji properties maka tahap selanjutnya adalah *mix design*. Pada penelitian ini, *mix design* dilakukan dengan cara eksperimen. Untuk dapat melaksanakan pembuatan sampel beton geopolimer diperlukan perhitungan mengenai jumlah bahan yang digunakan pada setiap satu silinder berdasarkan perbandingan massa yang digunakan. Mengdopsi dari penelitian sebelumnya, dengan perbandingan antara agregat dengan mortar sebesar 75 : 25 membutuhkan *fly ash* sebanyak 444 kg/m³ (mengacu pada penelitian terdahulu). Hasil *mix design* pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 3. Mix Design Beton Geopolimer

Sumber : Analisis Mix Design Peneliti (2023)

Gambar di atas merupakan hasil *mix design* yang direncanakan dalam penelitian ini. Konsentrasi molaritas Na₂SO₄ yang digunakan adalah 4 M, 6 M, dan 8 M. Detail pada tiap variasi dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Variasi Benda Uji

No	Nama Benda Uji	Beton	Na ₂ SiO ₃ : Na ₂ SO ₄	Molaritas	Umur	Jumlah Benda Uji
1	GC 4-7	75% : 25%	1 : 2	4 M	7 Hari	6
2	GC 6-7	75% : 25%	1 : 2	6 M	7 Hari	6
3	GC 8-7	75% : 25%	1 : 2	8 M	7 Hari	6
4	GC 4-28	75% : 25%	1 : 2	4 M	28 Hari	6
5	GC 6-28	75% : 25%	1 : 2	6 M	28 Hari	6
6	GC 8-28	75% : 25%	1 : 2	8 M	28 Hari	6

Sumber : Perencanaan Variasi Benda Uji Peneliti (2023)

Kebutuhan bahan pada tiap variasi adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Kebutuhan Bahan 1 Silinder

No	Nama Benda Uji	Fly Ash (kg)	Air (liter)	Na ₂ SO ₄ (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Ag. Kasar (kg)	Ag. Halus (kg)
1	GC 4-7	0.6974	0.1744	0.0990	0.0495	1.8	0.9
2	GC 6-7	0.6974	0.1744	0.1486	0.0743	1.8	0.9
3	GC 8-7	0.6974	0.1744	0.1981	0.09904	1.8	0.9
4	GC 4-28	0.6974	0.1744	0.0990	0.0495	1.8	0.9
5	GC 6-28	0.6974	0.1744	0.1486	0.0743	1.8	0.9
6	GC 8-28	0.6974	0.1744	0.1981	0.09904	1.8	0.9

Sumber : Analisis Peneliti (2023)

Tabel 3. Kebutuhan Bahan Total

No	Nama Benda Uji	Fly Ash (kg)	Air (liter)	Na ₂ SO ₄ (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Ag. Kasar (kg)	Ag. Halus (kg)
1	GC 4-7	4.1844	1.0464	0.594	0.297	10.8	5.4
2	GC 6-7	4.1844	1.0464	0.8916	0.4458	10.8	5.4
3	GC 8-7	4.1844	1.0464	1.1886	0.59424	10.8	5.4
4	GC 4-28	4.1844	1.0464	0.594	0.297	10.8	5.4
5	GC 6-28	4.1844	1.0464	0.8916	0.4458	10.8	5.4
6	GC 8-28	4.1844	1.0464	1.1886	0.59424	10.8	5.4
TOTAL		25.1064	6.2784	5.3484	2.67408	64.8	32.4

Sumber : Analisis Peneliti (2023)

Setelah melakukan perhitungan *mix design* maka dilanjutkan dengan pembuatan benda uji kemudian perawatan benda uji. Pegujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 hari dan 28 hari. Hasil dari pengujian kuat tekan adalah sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Nama Benda Uji	Umur (Hari)	No. Benda Uji	Berat Benda Uji (kg)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata Kuat Tekan f' _c
GC 4-7	7	1	3.777	3.072	0.932
		2	3.723	0.438	
		3	3.824	1.571	
		4	3.775	0.508	
		5	3.793	0.000	
		6	3.715	0.000	
GC 6-7	7	1	3.709	5.373	11.934
		2	3.802	11.325	
		3	3.863	11.334	

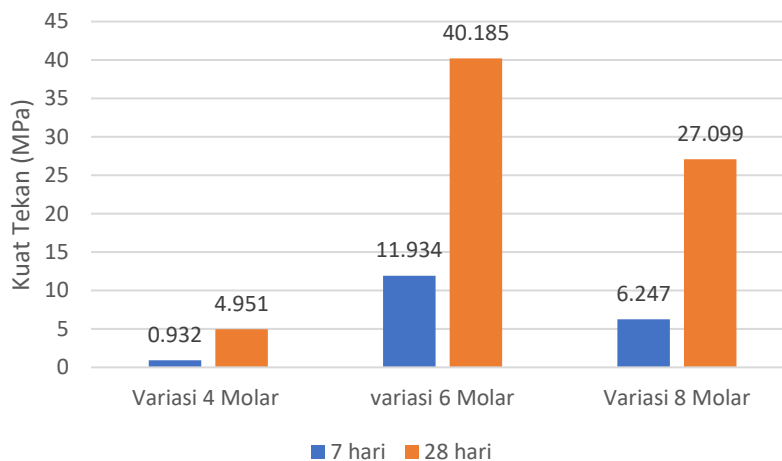
		4	3.773	12.934	
		5	3.855	16.613	
		6	3.805	14.024	
		1	3.844	4.922	
		2	3.744	4.102	
GC 8-7	7	3	3.809	10.152	6.247
		4	3.727	3.596	
		5	3.745	10.626	
		6	3.675	4.086	
		1	3.734	5.962	
		2	3.829	5.07	
GC 4-28	28	3	3.720	1.027	4.951
		4	3.858	5.021	
		5	3.801	8.946	
		6	3.774	3.681	
		1	3.736	20.74	
		2	3.739	44.998	
GC 6-28	28	3	3.693	45.883	40.185
		4	3.756	34.477	
		5	3.761	49.456	
		6	3.667	45.556	
		1	3.788	19.731	
		2	3.788	35.403	
GC 8-28	28	3	3.803	33.608	27.099
		4	3.777	30.049	
		5	3.684	16.665	
		6	3.834	27.139	

Sumber : Hasil Pengujian Peneliti di Laboratorium Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro (2023)

Dari gambar di atas dapat dilihat bahwa hasil rata-rata kuat tekan beton geopolimer pada umur 7 hari untuk variasi 4 M adalah sebesar 0.932 MPa, kemudian mengalami kenaikan nilai kuat tekan sebesar 11.002 MPa pada variasi 6 M dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 11.934 MPa, selanjutnya mengalami penurunan nilai kuat tekan sebesar 5.687 MPa pada variasi 8 M dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 6.247 MPa. Sedangkan, kuat tekan rata-rata beton geopolimer dengan umur 28 hari pada variasi 4 M adalah sebesar 4.951 MPa, kemudian mengalami kenaikan sebesar 35.234 MPa pada variasi 6 M dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 40.185 MPa, selanjutnya mengalami penurunan sebesar 13.086 MPa pada variasi 8 M dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 27.099 MPa.

Dari hasil uji kuat tekan yang telah dilakukan, dapat dilihat bahwa nilai kuat tekan benda uji pada tiap-tiap variasi sangatlah beragam. Hal itu kemungkinan terjadi karena metode yang digunakan pada saat pembuatan benda uji yaitu satu sampel satu adukan, sehingga menyebabkan adukan yang dihasilkan tidak konsisten dan berakibat pada hasil uji kuat tekan yang tidak konsisten pula.

Untuk perbedaan rata-rata hasil uji kuat tekan beton geopolimer pada tiap variasi dapat dilihat pada grafik di bawah ini.



Gambar 1. Grafik Rata-Rata Semua Variasi

Sumber : Hasil Pengujian Peneliti di Laboratorium Fakultas Sains dan Teknik Universitas Bojonegoro (2023)

Nilai rata-rata kuat tekan pada tiap variasi memiliki perbedaan yang cukup signifikan, pada variasi GC 4-7 dan GC 4-28 memiliki selisih nilai kuat tekan sebesar 4.019 MPa, sedangkan GC 6-7 dan GC 6-28 memiliki selisih sebesar 28.251 MPa, dan untuk variasi GC 8-7 dan GC 8-28 memiliki selisih sebesar 20.852 MPa. Melihat data di atas maka dapat dikatakan bahwa semakin lama umur beton maka nilai kuat tekan yang dihasilkan akan semakin besar. Hasil uji dengan nilai kuat tekan terbesar adalah pada variasi GC 6-28 dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 40.185 MPa.

Berdasarkan hasil uji kuat tekan di atas, terdapat data residual yang harus dihapus untuk tahap perhitungan standar deviasi. Hasil dari perhitungan standar deviasi adalah sebagai berikut :

Tabel 5. Hasil Perhitungan Standar Deviasi

Nama Benda Uji	Xi	Xrt	(Xi-Xrt) ²	Σ(Xi-Xrt) ²	Standar Deviasi
GC 4-7	0.438	1.397	0.920	4.546	1.231
	0.508		0.791		
	3.072		2.805		
	1.571		0.030		
	11.325		1.165		
GC 6-7	11.334	12.404	1.145	5.214	1.318
	12.934		0.281		
	14.024		2.624		
	4.922		0.556		
	4.102		0.006		
GC 8-7	3.596	4.177	0.337	0.906	0.550
	4.086		0.008		
	5.962		1.058		
GC 4-28	5.070	4.934	0.019	2.653	0.940

	5.021		0.008		
	3.681		1.569		
	44.998		2.176		
GC 6-28	45.883	46.473	0.348	12.263	2.022
	45.556		0.841		
	49.456		8.897		
	35.403		14.848		
GC 8-28	33.608	31.550	4.236	40.791	3.687
	30.049		2.252		
	27.139		19.455		

Sumber : Hasil Analisis Peneliti (2023)

Dari tabel hasil perhitungan standar deviasi menggunakan data hasil uji kuat tekan tanpa residual di atas, maka dapat dikatakan bahwa perhitungan standar deviasi mengalami penyimpangan pada variasi GC 6-28 dan GC 8-28 karena memiliki nilai di atas 1.64.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa nilai kuat tekan rata-rata beton geopolimer pada umur beton 7 hari dengan konsentrasi molaritas 4 M sebesar 0.932 MPa, sedangkan 6 M sebesar 11.934 MPa, dan 8 M sebesar 6.274 MPa. Sedangkan nilai kuat tekan rata-rata beton geopolimer pada umur beton 28 hari dengan konsentrasi molaritas 4 M sebesar 4.951 MPa, sedangkan 6 M sebesar 40.185 MPa, dan 8 M sebesar 27.099 MPa. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin lama umur beton maka nilai kuat tekan yang dihasilkan semakin besar. Dari hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer pada penelitian ini, beton geopolimer dengan konsentrasi molaritas 4 M pada umur beton 7 hari hanya memberikan kuat tekan yang sangat kecil yaitu sebesar 0.932 MPa. Sedangkan variasi optimum berada pada beton geopolimer dengan konsentrasi molaritas 6 M pada umur 28 hari. Nilai kuat tekan rata-rata pada variasi ini adalah sebesar 40.185 MPa. Sedangkan nilai optimal kuat tekan beton geopolimer pada penelitian ini mencapai 49.456 MPa pada sampel GC 6-28.

SARAN

Berdasarkan proses pelaksanaan dan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dan dapat menjadi saran untuk peneliti selanjutnya.

1. Sebaiknya menggunakan perlengkapan pelindung dalam pembuatan beton geopolimer seperti sarung tangan dan masker, karena bahan yang digunakan berbahaya bagi tubuh.
2. Dianjurkan untuk pengujian kandungan *fly ash* sehingga *mix design* dapat dilakukan dengan maksimal.
3. Perlu memperhatikan penggunaan pelumas pada cetakan benda uji karena sangat mempengaruhi bentuk benda uji. Apabila pelumas yang digunakan terlalu sedikit, maka benda uji akan lengket dan susah untuk dibuka dari cetakan.

4. Perlu diperhatikan proses pemadatan pada saat proses pengecoran agar benda uji tidak keropos atau berongga.
5. Melakukan peninjauan biaya yang dikeluarkan selama produksi, karena bahan kimia yang digunakan dalam pembuatan beton geopolimer termasuk bahan dengan harga yang tidak murah.
6. Lebih memperhatikan *setting time* karena beton geopolimer merupakan salah satu beton yang cepat mengeras.
7. Dalam pembuatan benda uji, pengadukan sebaiknya dilakukan satu kali dalam satu variasi agar pada saat dilakukan uji kuat tekan mendapatkan hasil yang merata.

DAFTAR PUSTAKA

- B., D. S. (2021). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash PLTU Tanjungjati B Jepara. *Bangun Rekaprima* Vol. 07.
- Bayu Syafputra, E. K. (2020). Pengaruh Variasi Molaritas Pada Kuat Tekan Beton Geopolymer Fly Ash Dengan Gregat Halus Pasir Kuarsa. *Jurnal Ilmiah SANTIKA* Volume 10 No. 1.
- C618-93, A. (t.thn.). Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete. *American Society for Testing of Concrete's*, 1991.
- Darma Adi S., F. R. (2018). Studi Experimental Pengaruh Perbedaan Molaritas Aktivator Pada Perilaku Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash. *JURNAL KARYA TEKNIK SIPIL*, Vol 7 No 1, 89-98.
- Davidovits. (1997). *Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*. Perancis : Geopolymer Institute.
- Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*.
- Ekaputri, J. J. (2007). Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Jawa Power Paiton Sebagai Material Alternatif. *Jurnal PONDASI* Vol 13 No 2.
- Ekaputri, j. j. (2011). Geopolymer Concrete Using Fly Ash, Trass, Sidoarjo Mud Base Material. *ITS Journal of Civil Engineering / Vol 31 No 2*.
- Elektronik, L. P. (2010-2022). Website.
- Habel, Y. (2021). *Analisis Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Fly Ash Dicampur Ampas Kopi*.
- I Made Alit Karyawan, d. (2020). Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Abu Terbang. *Jurnal Spektran*, Vol. 8 No. 1.
- Indonesia, B. S. (1990). Agregat Beton, Mutu dan Cara Uji. SNI 03-1750, Indonesia.
- Indonesia, B. S. (1990). Metode Pengujian Kuat Tekan Beton. SNI 03-1974.
- Lutfiani, B., Zakina, A., Santoso, T. B., Syahrul, O., & Lempung, T. (2022). De ' Teksi Jurnal Teknik Sipil Unigoro STUDY OF BOJONEGORO SOIL STABILIZATION USING SAND AND LIME Abstrak De ' Teksi Jurnal Teknik Sipil Unigoro ISSN : 2502-3152. 7(2), 11–20.
- Manuahe R, S. M. (2014). Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Fly Ash. *Jurnal Sipil Statik* Vol 2 No 16, Universitas Sam Ratulangi, Manado.
- Materials, A. S. (1982). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM C33.

- Medical, Z. (2022). 俞快¹, 张利², 叶祥明² 1. 28(2), 190–198.
- Mira Setiawati, R. A. (2022). Variasi Molaritas NaOH Dan Alkali Ktivor Beton Geopolimer. *JURNAL DEFORMASI*.
- Nasional, B. S. (2008). Pengujian Berat Jenis Pasir dan Kerikil. *SNI 1970-2008*.
- Nasional, B. S. (2011). Tata Cara Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium. *SNI 2493-2011*.
- Nisa Latifah Gandina, Y. D. (2020). Studi Eksperimental Beton Geopolimer Dengan Memanfaatkan Fly Ash Sebagai Pengganti Semen Dan Serat Mat Sebagai Aditif. *Civil Engineering Research Journal Vol 1 No 1*.
- Prasetyo, G. B. (2015). Tinjauan Kuat Tekan Beton Geopolimer Dengan Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen.
- Rafli Andaru Ikomudin, d. (2016). Ketahanan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash Terhadap Sulfat Dan Klorida. *Reka Rencana. Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*.
- Ridwan, M. (2018). Karakteristik Beton Geopolimer Menggunakan Limbah Fly Ash PLTU Tanjung Jati B Jepara.
- Santoso, T. B. (2023). Pemanfaatan Lusi dan Fly Ash Sebagai Material Bautan Berdasarkan Nilai Berat Jenis Agregat Halus dan Porositas. *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 6(1), 12–17. <https://doi.org/10.14710/potensi.2023.16934>
- Santoso, T. B., Prastyanto, C. A., & Ekaputri, J. J. (2021). Pemanfaatan Lumpur Sidoarjo dan Fly Ash Sebagai Material Buatan Berbasis Pasta Berdasarkan Nilai Kuat Tekan dan Keausan. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 19(1), 39. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v19i1.8444>
- Suprpto, E., Andryan, M., Purnama, C., & Santoso, T. B. (2023). Evaluasi Kinerja Perkuatan Gedung Menggunakan Carbon Fiber Reinforced Polymer (CRFP) Performance Evaluation Of Building Reinforcement Fiber Reinforced Polymer (CRFP). <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/HEXAGON/article/view/8758/4379>
- SK-SNI-T-15-1990-03. (1990). Gradasi Agregat Halus. *Jakarta : Departemen Pekerjaan Umum*.
- SNI. (2013). Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung.
- SNI, 1969:2008. (2008). Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar.
- Tjokrodinuljo. (1996). Teknologi Beton. *Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UGM*.
- Tjokrodinuljo. (2007). Teknologi Beton.
- Y, S. (2014). Pengaruh Variasi Umur Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Dengan Menggunakan Abu Terbang (Fly Ash). *Universitas Muhammadiyah Yogyakarta*.
- Yasin, A. K. (2017). *Rekayasa Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash*.