PENGARUH UMUR DAN FAKTOR AIR SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH*

Sergio Meo [1], Yosimson P Manaha[2], dan Vega Aditama[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malang
Email: sergiomeo21@gmail.com
[2] Program Studi Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malang
Email: yosimson_manaha@lecturer.itn.ac.id
[3] Program Studi Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

ABSTRACT

Geopolymer concrete is an innovative construction material developed as an alternative to conventional concrete by utilizing fly ash as a binder, thereby reducing the use of Portland cement and the carbon emissions generated during cement production. One of the factors affecting the properties of geopolymer concrete is the water-to-cementitious ratio (W/C), which influences both the workability and compressive strength of the concrete. This study aimed to analyze the effect of varying water-to-cementitious ratios on the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. An experimental method was employed using fly ash as the precursor, an 8 M potassium hydroxide (KOH) solution, and sodium silicate (Na_2SiO_3) as alkaline activators, with water-to-cementitious ratio variations of 0.3, 0.4, 0.5, and 0.6. Prior to specimen preparation, material characterization tests were conducted to ensure that the constituent materials met the requirements for geopolymer concrete. Slump tests and compressive strength tests were then performed at the ages of 14, 21, and 28 days. The test results were analyzed using confidence interval analysis, polynomial regression analysis, and correlation analysis to determine the relationship between the water-to-cementitious ratio and the compressive strength of geopolymer concrete. The results indicated that the compressive strength of geopolymer concrete generally increased with curing age, with the highest compressive strength of 34.78 MPa obtained at a W/C ratio of 0.3 at 28 days, while the lowest compressive strength of 20.13 MPa was recorded at a W/C ratio of 0.6 at 14 days. Furthermore, increasing the water-to-cementitious ratio tended to reduce the compressive strength due to increased porosity, resulting in a less dense concrete structure. Therefore, both the water-to-cementitious ratio and curing age significantly influenced the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete, with a W/C ratio of 0.3 producing the optimum compressive strength and being recommended as the most effective mixture proportion in this study.

Keywords: geopolymer concrete, fly ash, water-to-cementitious ratio, compressive strength.

ABSTRAK

Beton geopolimer merupakan salah satu inovasi material konstruksi yang dikembangkan sebagai alternatif pengganti beton konvensional karena memanfaatkan fly ash sebagai material pengikat, sehingga dapat mengurangi penggunaan semen portland dan emisi karbon yang dihasilkan dari proses produksi semen. Salah satu faktor yang memengaruhi sifat beton geopolimer adalah faktor air semen (FAS) atau water-cement ratio (W/C), yang berpengaruh terhadap kemudahan pengerjaan (workability) dan kuat tekan beton. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi faktor air semen terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen dengan menggunakan fly ash sebagai prekursor, larutan aktivator kalium hidroksida (KOH) 8 M dan natrium silikat (Na_2SiO_3), serta variasi faktor air semen sebesar 0,3; 0,4; 0,5; dan 0,6. Sebelum pembuatan benda uji dilakukan pengujian karakteristik material untuk memastikan material yang digunakan memenuhi persyaratan sebagai bahan penyusun beton geopolimer. Selanjutnya dilakukan slump test dan pengujian kuat tekan beton pada umur 14, 21, dan 28 hari. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan interval kepercayaan, analisis regresi polinomial, dan uji korelasi untuk mengetahui hubungan antara faktor air semen dan kuat tekan beton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton geopolimer cenderung meningkat seiring bertambahnya umur beton, dengan nilai kuat tekan tertinggi sebesar 34,78 MPa pada variasi W/C 0,3 umur 28 hari, sedangkan nilai terendah sebesar 20,13 MPa pada variasi W/C 0,6 umur 14 hari. Selain itu, peningkatan nilai faktor air semen menyebabkan kuat tekan beton geopolimer cenderung menurun akibat meningkatnya porositas sehingga struktur beton menjadi kurang padat. Dengan demikian, variasi faktor air semen dan umur beton berpengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash, di mana variasi W/C 0,3 menghasilkan kuat tekan optimum dan direkomendasikan sebagai komposisi yang paling efektif pada penelitian ini.

Kata kunci : beton geopolimer, fly ash, faktor air semen, kuat tekan beton.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang banyak digunakan karena memiliki kuat tekan yang tinggi dan mudah dibentuk. Namun, penggunaan semen portland sebagai bahan pengikat utama menghasilkan emisi karbon yang cukup besar selama proses produksinya. Salah satu alternatif yang dikembangkan untuk mengurangi penggunaan semen portland adalah beton geopolimer yang memanfaatkan *fly ash* sebagai material pengikat dengan bantuan larutan aktivator alkali. Selain ramah lingkungan, pemanfaatan *fly ash* juga dapat meningkatkan nilai guna limbah hasil pembakaran batu bara.

Salah satu faktor yang memengaruhi sifat beton geopolimer adalah faktor air semen (*water-cement ratio* atau W/C). Nilai W/C berpengaruh terhadap kemudahan pengerjaan (*workability*) dan kuat tekan beton. Nilai W/C yang terlalu rendah menyebabkan campuran sulit dikerjakan, sedangkan nilai yang terlalu tinggi dapat meningkatkan porositas sehingga kuat tekan beton menurun. Selain itu, kuat tekan beton geopolimer juga dipengaruhi oleh umur beton karena proses geopolimerisasi masih berlangsung selama masa perawatan.

Beberapa penelitian terdahulu menunjukkan bahwa variasi faktor air semen memberikan pengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer. Namun, hasil penelitian mengenai pengaruh variasi W/C pada beberapa umur beton masih perlu dikaji lebih lanjut untuk memperoleh nilai W/C yang menghasilkan kuat tekan optimum.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen di laboratorium untuk menganalisis pengaruh variasi faktor air semen (*water-cement ratio* atau W/C) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis *fly ash*. Seluruh tahapan penelitian meliputi pemeriksaan karakteristik material, pembuatan benda uji, pengujian slump, pengujian kuat tekan, serta analisis data hasil pengujian.

Material penyusun beton geopolimer terdiri atas *fly ash* sebagai prekursor, agregat halus, agregat kasar, larutan kalium hidroksida (KOH) dengan konsentrasi 8 M, dan natrium silikat (Na_2SiO_3) sebagai larutan aktivator. Sebelum digunakan, seluruh material diuji terlebih dahulu untuk mengetahui kesesuaiannya terhadap standar yang berlaku. Pengujian material meliputi analisis saringan, kadar lumpur, berat jenis dan penyerapan agregat, berat isi agregat, keausan agregat kasar, pengujian konsistensi normal, waktu ikat pasta geopolimer, serta karakterisasi kimia *fly ash* menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF).

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi faktor air semen (*water-cement ratio* atau W/C) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis *fly ash*. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perkembangan kuat tekan beton pada umur 14, 21, dan 28 hari serta menentukan variasi W/C yang menghasilkan kuat tekan optimum.

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional (ITN) Malang. Pelaksanaan penelitian meliputi persiapan material, pemeriksaan karakteristik material, pembuatan benda uji, perawatan (*curing*), hingga pengujian kuat tekan beton geopolimer. Penelitian dilaksanakan mulai bulan Maret 2026 hingga Juli 2026 mencakup pemeriksaan karakteristik material, pembuatan benda uji, pengujian slump, pengujian kuat tekan, serta analisis data hasil pengujian.

Populasi dan Sampel

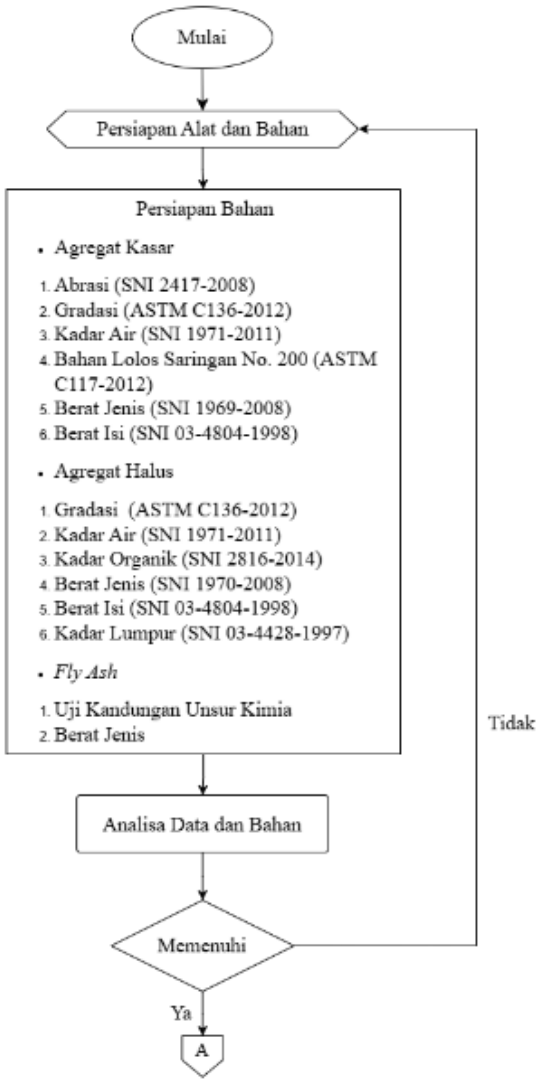
Tabel 1 Variasi dan Jumlah Benda Uji

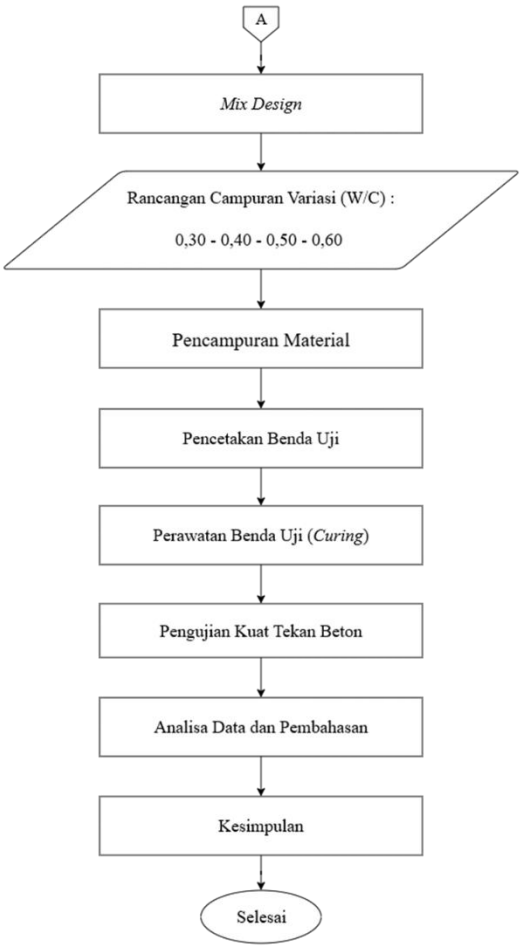
Pengujian Kuat Tekan								
Faktor Air semen (W/C)	Dimensi Benda Uji	Umur Pengujian						Total benda uji
		14 hari	Kode	21 hari	Kode	28 hari	Kode	
0,30	Ø10 x 20 cm	3	3A	3	3D	3	3G	9
			3B		3E		3H	
			3C		3F		3I	
0,40	Ø10 x 20 cm	3	4A	3	4D	3	4G	9
			4B		4E		4H	
			4C		4F		4I	
0,50	Ø10 x 20 cm	3	5A	3	5D	3	5G	9
			5B		5E		5H	
			5C		5F		5I	
0,60	Ø10 x 20 cm	3	6A	3	6D	3	6G	9
			6B		6E		6H	
			6C		6F		6I	
Total								36

(Hasil analisis)

Populasi dalam penelitian ini adalah seluruh benda uji beton geopolimer berbasis *fly ash* yang dibuat dengan variasi faktor air semen (*water-cement ratio*) seperti yang ditunjukan pada tabel 1. Sampel penelitian berupa benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm dengan empat variasi nilai W/C, yaitu 0,3; 0,4; 0,5; dan 0,6. Pada setiap variasi dibuat 9 benda uji yang terdiri atas 3 benda uji untuk umur 14 hari, 3 benda uji untuk umur 21 hari, dan 3 benda uji untuk umur 28 hari, sehingga jumlah keseluruhan sampel penelitian adalah 36 benda uji.

Diagram Alir





Gambar 1 Diagram Alir

3. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Konsistensi Normal

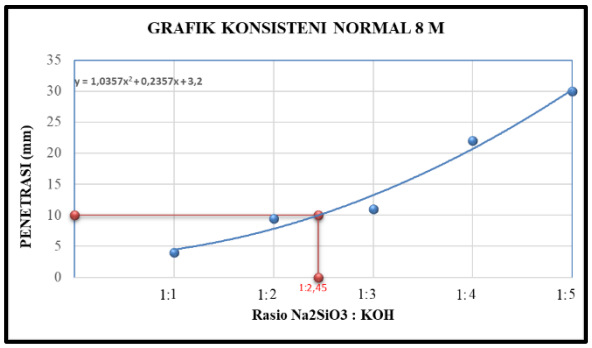
Pengujian konsistensi normal dilakukan menggunakan alat Vicat dengan variasi rasio KOH:Na_2SiO_3 sebesar 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, dan 1:5. Pengujian bertujuan untuk menentukan rasio larutan aktivator yang menghasilkan kedalaman penetrasi 10 ± 1 mm sebagai konsistensi normal pasta geopolimer.

Tabel 2 Konsistensi Normal Pasta Geopolimer 8 M

No	*Fly Ash* (gr)	Rasio	KOH (gr)	Na_2SiO_3 (gr)	Air (gr)	Penetrasi
1	300	1:1	16,83	16,83	41,34	4
2	300	1:2	11,22	22,44	41,34	9,5
3	300	1:3	8,42	25,25	41,34	11
4	300	1:4	6,73	26,93	41,34	22
5	300	1:5	5,61	28,05	41,34	30

(Hasil analisis)

Hasil pembacaan penetrasi pada pengujian konsistensi normal disajikan pada Tabel 2. Pengujian dilakukan dengan variasi rasio KOH : Na_2SiO_3, sedangkan jumlah *fly ash* dan air dijaga tetap.



Gambar 2 Grafik Konsistensi Normal 8 M
(Hasil analisis)

Gambar 2 menunjukkan bahwa konsistensi normal tercapai pada rasio KOH:Na_2SiO_3 1:2,45 dengan kedalaman penetrasi 10 mm, yang selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam pengujian waktu ikat.

Waktu Ikat

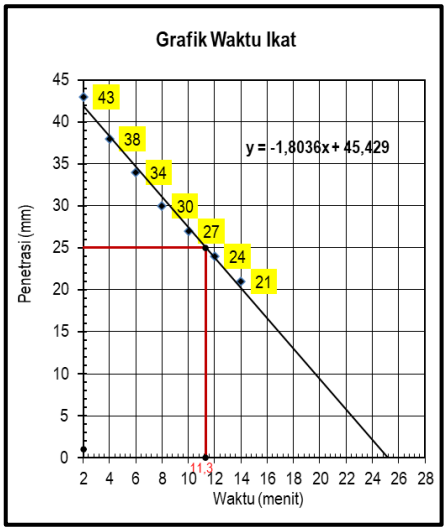
Pengujian waktu ikat dilakukan menggunakan alat vicat pada pasta geopolimer dengan rasio larutan aktivator yang telah memenuhi konsistensi normal. Pengujian bertujuan untuk menentukan waktu ikat awal dan waktu ikat akhir berdasarkan perubahan kedalaman penetrasi jarum vicat selama proses geopolimerisasi.

Tabel 3 Waktu Ikat Pasta Geopolimer

Awal		
No	**Waktu (menit)**	**Penetrasi (mm)**
1	2	43
2	4	36
3	6	30
4	8	27
5	10	24
6	12	21
7	14	Berbekas
8	16	Berbekas
9	18	Berbekas
10	20	Berbekas
11	22	Berbekas
12	24	Berbekas
13	26	Berbekas
14	28	Tidak Berbekas
Akhir		
28		

(Hasil analisis)

Berdasarkan Tabel 3, nilai penetrasi jarum Vicat menurun seiring bertambahnya waktu pengujian, menunjukkan bahwa pasta geopolimer semakin mengeras akibat proses geopolimerisasi. Pasta mencapai waktu ikat awal pada menit ke-12 dengan penetrasi 21 mm, sedangkan waktu ikat akhir terjadi pada menit ke-28, saat jarum vicat tidak lagi meninggalkan bekas pada permukaan pasta.



Gambar 3 Grafik Waktu Ikat Pasta Geopolimer
(Hasil analisis)

Berdasarkan Gambar 3, waktu ikat awal pasta geopolimer terjadi pada menit ke-11,3 saat nilai penetrasi mencapai 25 mm, sedangkan waktu ikat akhir terjadi pada menit ke-28, yang ditandai dengan jarum vicat jenis D tidak lagi meninggalkan bekas pada permukaan pasta geopolimer.

Hasil Pengujian Material

Sebelum proses pembuatan beton geopolimer, dilakukan pengujian terhadap material penyusun untuk memastikan bahwa seluruh material memenuhi persyaratan sebagai bahan campuran beton. Pengujian meliputi analisis saringan, kadar lumpur, berat jenis dan penyerapan agregat, berat isi agregat, keausan agregat kasar, konsistensi normal, waktu ikat pasta geopolimer, serta karakterisasi kimia *fly ash* menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF).

Hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat halus dan agregat kasar memenuhi persyaratan berdasarkan standar SNI yang digunakan, sehingga layak digunakan sebagai material penyusun beton geopolimer. Hasil pengujian XRF menunjukkan bahwa fly ash memiliki kandungan senyawa utama berupa SiO_2, Al_2O_3, dan CaO yang berperan penting dalam proses geopolimerisasi. Kandungan silika dan alumina yang tinggi memungkinkan terbentuknya ikatan geopolimer yang memberikan kontribusi terhadap peningkatan kuat tekan beton.

Tabel 4 Pengujian Material

No	Pengujian	Standar Acuan	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Isi Gembur Agregat Kasar	SNI 03-4804-1998	-	1,427 gr/cm³	-
	Berat Isi Padat Agregat Kasar			1,505 gr/cm³	
	Berat Isi Gembur Agregat Halus			1,595 gr/cm³	
	Berat Isi Padat Agregat Halus			1,682 gr/cm³	
	Berat Isi Gembur *Fly Ash*			1,190 gr/cm³	
	Berat Isi Padat *Fly Ash*			1,295 gr/cm³	
2	Analisa Saringan Agregat Kasar	SNI 03-1968-1990	-	Ag Maks 20 mm	-
	Analisa Saringan Agregat Halus			Zona 2	
3	Kadar Lumpur Agregat Halus	SNI 03-4428-1997	< 5 %	2,4 %	Memenuhi
4	Kadar Zat Organik Agregat Halus	SNI 2816:2014	-	Warna Cairan Bening	-
5	Kadar Air Agregat Kasar	SNI 03-1971-1990	-	3,90 %	-
	Kadar Air Agregat Halus			5,50 %	
6	*Abrasi Test*	SNI 2417-2008	< 40 %	12,93 %	Memenuhi
7	BJ dan Penyerapan Agregat Kasar	SNI 1970:2008	-		-
	Bulk			2,668	
	SSD			2,711	
	Apparent			2,789	
	Absorbsi			1,624	
8	BJ dan Penyerapan Agregat Kasar	NI 1969:2008	-		-
	Bulk			2,678	
	SSD			2,702	
	Apparent			2,743	
	Absorbsi			0,880	
9	BJ *Fly Ash*	SNI 03-2531 1991	-	2,74	-
10	Konsistensi Normal dan Waktu Ikat	SNI 15-2049-2004			
	Waktu Ikat Awal		Min 45 Menit	11,3 Menit	Tidak Memenuhi
	Waktu Ikat Akhir		Maks 375 Menit	28 Menit	Tidak Memenuhi
11	Fly Ash (Tipe F)	SNI 2460 : 2014			
	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$		≥ 70 %	72,5 %	Memenuhi
	SO_3		< 5 %	0,8 %	Memenuhi

(Hasil analisis)

Tabel 4 merupakan rekapitulasi hasil seluruh pengujian material yang digunakan dalam penelitian, meliputi pengujian sifat fisik agregat kasar, agregat halus, dan *fly ash*. Hasil pengujian dibandingkan dengan standar acuan yang berlaku untuk mengetahui apakah material yang digunakan telah memenuhi syarat SNI sebagai bahan penyusun beton geopolimer.

Mix Design

Perancangan campuran (*mix design*) dilakukan berdasarkan variasi faktor air semen (*water-cement ratio*) sebesar W/C 0,3; 0,4; 0,5; dan 0,6 dengan tetap mempertahankan komposisi agregat dan *fly ash*. Variasi W/C dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah cairan terhadap sifat beton geopolimer, khususnya kemudahan pengerjaan dan kuat tekan.

Pada setiap variasi dibuat sembilan benda uji silinder berukuran 10 cm × 20 cm, sehingga total benda uji sebanyak 36 buah. Seluruh campuran menggunakan larutan aktivator berupa KOH 8 M dan Na_2SiO_3 sesuai komposisi yang telah ditentukan pada proses *mix design*.

Tabel 5 Komposisi Akhir Campuran Beton Geopolimer Kondisi Lapangan Benda Uji 36 Silinder

Faktor Air Semen (W/C)	*Fly Ash* (kg)	Agregat Halus (kg)	Agregat Kasar (kg)	KOH (8 M) (kg)	Na_2SiO_3 (kg)
0,3	11,79	10,42	16,76	0,78	1,92
0,4	8,84	12,11	17,53	0.92	2,26
0,5	7,07	13,50	17,95	0,91	2,23
0,6	5,,90	14,68	17,99	0,90	2,20
Total	**33,60**	**50,71**	**70,23**	**3,51**	**8,61**

(Hasil analisis)

Tabel 5 merupakan komposisi akhir kebutuhan material campuran beton geopolimer untuk setiap variasi faktor air semen berdasarkan hasil perancangan campuran (*mix design*). Setiap variasi digunakan untuk pembuatan 9 silinder benda uji sehingga jumlah keseluruhan benda uji dalam penelitian ini adalah 36 silinder.

Persiapan Material dan Bekisting

Sebelum proses pengecoran, seluruh material penyusun beton geopolimer dipersiapkan sesuai komposisi *mix design*, meliputi *fly ash*, agregat halus, agregat kasar, larutan KOH 8 M, dan Na_2SiO_3. Seluruh material ditimbang sesuai kebutuhan setiap variasi faktor air semen.

Bekisting silinder berukuran Ø10 cm × 20 cm dibersihkan kemudian diolesi lapisan tipis solar untuk mempermudah pelepasan benda uji. Selanjutnya, peralatan pengecoran seperti wadah pencampur, sekop, tongkat penumbuk, dan alat uji slump dipersiapkan dalam kondisi bersih sehingga proses pembuatan benda uji dapat berlangsung dengan baik.

Pencampuran dan Pencetakan Benda Uji

Pencampuran beton geopolimer diawali dengan mencampurkan secara merata *fly ash*, agregat halus, dan agregat kasar. Selanjutnya, larutan aktivator yang terdiri atas KOH 8 M dan Na_2SiO_3 ditambahkan secara bertahap sambil diaduk hingga diperoleh campuran yang homogen. Setelah dilakukan pengujian slump, campuran beton segar dimasukkan ke dalam bekisting silinder berukuran Ø10 cm × 20 cm secara bertahap dalam tiga lapis. Setiap lapisan dipadatkan menggunakan tongkat penumbuk sebanyak 25 kali untuk meminimalkan rongga udara dan menghasilkan benda uji yang seragam.

Pengujian Slump

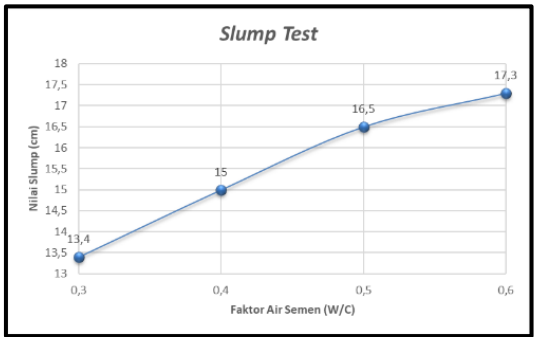
Pengujian slump dilakukan setelah proses pencampuran beton geopolimer untuk mengetahui tingkat kelecakan (*workability*) campuran. Pengujian menggunakan kerucut Abrams sesuai SNI 1972:2008. Beton segar dimasukkan ke dalam cetakan dalam tiga lapis, kemudian setiap lapisan dipadatkan sebanyak 25 kali menggunakan tongkat penumbuk. Setelah cetakan diangkat secara vertikal, nilai penurunan beton (slump) diukur dalam satuan sentimeter (cm).

Tabel 6 Hasil Pengujian Slump

No	FAS (W/C)	Nilai Slump (cm)
1	0,3	13,4
2	0,4	15
3	0,5	16,5
4	0,6	17,3

(Hasil analisis)

Untuk memperjelas hubungan antara faktor air semen dan nilai slump, hasil pengujian disajikan dalam bentuk grafik seperti dibawah ini :



Gambar 4 Grafik Hubungan Nilai Slump Dengan W/C

(Hasil analisis)

Berdasarkan grafik 4 pada gambar, nilai slump meningkat seiring bertambahnya faktor air semen. Semakin tinggi faktor air semen, campuran beton geopolimer menjadi lebih encer sehingga workability meningkat.

Perawatan Benda Uji

Setelah proses pengecoran, benda uji didiamkan selama ± 24 jam pada suhu ruang hingga mengeras, kemudian dilepas dari bekisting. Selanjutnya, benda uji dirawat (*curing*) pada suhu ruang dengan permukaannya ditutup menggunakan kain basah untuk menjaga kelembapan hingga mencapai umur pengujian, yaitu 14, 21, dan 28 hari.

Analisis Data Kuat Tekan

Nilai kuat tekan dihitung berdasarkan perbandingan antara beban maksimum yang diterima benda uji dengan luas penampang silinder. Selanjutnya, data dianalisis menggunakan analisis regresi polinomial untuk mengetahui hubungan antara faktor air semen terhadap kuat tekan beton geopolimer.



Gambar 5 Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer

(Dokumentasi penulis)

Gambar 5 menunjukkan proses pengujian kuat tekan beton menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM). Benda uji diberi beban tekan secara bertahap hingga mengalami keruntuhan, kemudian beban maksimum yang diperoleh digunakan untuk menghitung kuat tekan beton geopolimer.

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

Keterangan :

P = Gaya tekan aksial (kN)

A = Luas penampang melintang (mm^2)

Contoh perhitungan kuat tekan beton geopolimer, silinder 10x20 cm :

$P = 274\ kN = 274000\ N$

$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3{,}14\ 10^2}{4} = 78{,}54\ cm^2 = 7854\ mm^2$

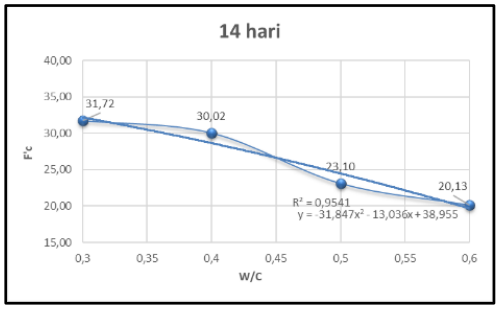
$f'c = \frac{P}{A} = \frac{274000}{7854} = 34{,}90\ MPa$

Tabel 7 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 14 Hari

Umur 14 Hari					
Faktor Air Semen (W/C)	Kode	Berat (kg)	Gaya Tekan Aksial (KN)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Rata-rata (MPa)
0,3	3A	3,72	236	30,06	31,72
	3B	3,78	260	33,12	
	3C	3,73	251	31,97	
0,4	4A	3,82	274	34,90	30,02
	4B	3,86	242	30,83	
	4C	3,89	191	24,33	
0,5	5A	3,91	156	19,87	23,10
	5B	3,94	172	21,91	
	5C	3,89	216	27,52	
0,6	6A	3,92	153	19,49	20,13
	6B	3,90	143	18,22	
	6C	3,91	178	22,68	

(Hasil analisis)

Berdasarkan Tabel 7, kuat tekan beton geopolimer umur 14 hari menurun seiring meningkatnya faktor air semen (W/C). Kuat tekan rata-rata tertinggi diperoleh pada variasi W/C 0,3 sebesar 31,72 MPa, sedangkan terendah pada W/C 0,6 sebesar 20,13 MPa.



Gambar 6 Kuat Tekan Rata-rata Beton Geopolimer Umur 14 Hari
(Hasil analisis)

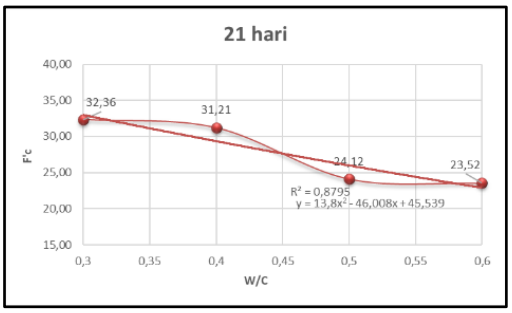
Gambar 5 menunjukkan bahwa kuat tekan beton geopolimer umur 14 hari menurun seiring meningkatnya faktor air semen (W/C). Hubungan tersebut dimodelkan dengan regresi polinomial orde dua yang menghasilkan persamaan y = – 31,847x2 – 13,036x + 38,955.

Tabel 8 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 21 Hari

Umur 21 Hari					
Faktor Air Semen (W/C)	Kode	Berat (kg)	Gaya Tekan Aksial (KN)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Rata-rata (MPa)
0,3	3D	3,82	248	31,59	32,36
	3E	3,76	253	32,23	
	3F	3,77	261	33,25	
0,4	4D	3,93	252	32,10	31,21
	4E	4,00	236	30,06	
	4F	3,89	247	31,46	
0,5	5D	3,93	163	20,76	24,12
	5E	3,89	182	23,18	
	5F	3,88	223	28,41	
0,6	6D	3,83	180	22,93	23,52
	6E	3,95	230	29,30	
	6F	4,02	144	18,34	

(Hasil analisis)

Berdasarkan Tabel 8, kuat tekan beton geopolimer umur 21 hari dipengaruhi oleh variasi faktor air semen (W/C). Nilai kuat tekan rata-rata berturut-turut sebesar 32,36 MPa, 31,21 MPa, 24,12 MPa, dan 23,52 MPa pada variasi W/C 0,3; 0,4; 0,5; dan 0,6, yang menunjukkan bahwa peningkatan nilai W/C menyebabkan kuat tekan beton geopolimer menurun.



Gambar 7 Kuat Tekan Rata-rata Beton Geopolimer Umur 21 Hari
(Hasil analisis)

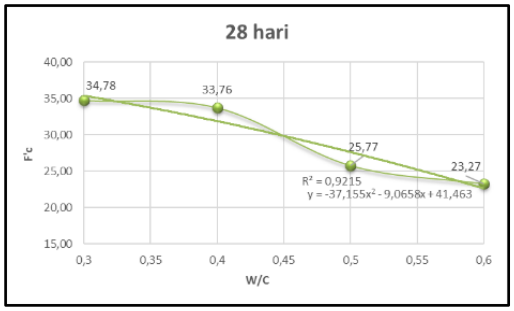
Gambar 7 menunjukkan bahwa kuat tekan beton geopolimer umur 21 hari cenderung menurun seiring meningkatnya faktor air semen (W/C). Hubungan tersebut dimodelkan dengan regresi polinomial orde dua yang menghasilkan persamaan y =13,8x2-46,008x + 45,539.

Tabel 9 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Hari

Umur 21 Hari					
Faktor Air Semen (W/C)	Kode	Berat (kg)	Gaya Tekan Aksial (KN)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Rata-rata (MPa)
0,3	3D	3,82	248	31,59	32,36
	3E	3,76	253	32,23	
	3F	3,77	261	33,25	
0,4	4D	3,93	252	32,10	31,21
	4E	4,00	236	30,06	
	4F	3,89	247	31,46	
0,5	5D	3,93	163	20,76	24,12
	5E	3,89	182	23,18	
	5F	3,88	223	28,41	
0,6	6D	3,83	180	22,93	23,52
	6E	3,95	230	29,30	
	6F	4,02	144	18,34	

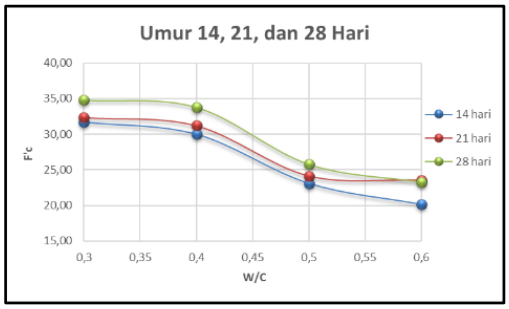
(Hasil analisis)

Berdasarkan Tabel 9, kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari dipengaruhi oleh variasi faktor air semen (W/C). Nilai kuat tekan rata-rata berturut-turut sebesar 34,78 MPa, 33,76 MPa, 25,77 MPa, dan 23,27 MPa pada variasi W/C 0,3; 0,4; 0,5; dan 0,6, yang menunjukkan bahwa peningkatan nilai W/C menyebabkan penurunan kuat tekan beton geopolimer.



Gambar 8 Kuat Tekan Rata-rata Beton Geopolimer Umur 28 Hari
(Hasil analisis)

Gambar 7 menunjukkan bahwa kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari menurun seiring meningkatnya faktor air semen (W/C). Hubungan tersebut dimodelkan dengan regresi polinomial orde dua yang menghasilkan persamaan y = – 37,155x2 – 9,0658x + 41,463.



Gambar 9 Kuat Tekan Rata-rata Gabungan Beton Geopolimer Umur 14, 21 dan 28 Hari
(Hasil analisis)

Gambar 8 menunjukkan bahwa kuat tekan beton geopolimer berbasis *fly ash* dipengaruhi oleh variasi faktor air semen (W/C) dan umur beton. Secara umum, kuat tekan meningkat seiring bertambahnya umur pengujian. Namun, pada variasi W/C 0,6, kuat tekan umur 28 hari (23,27 MPa) sedikit lebih rendah dibandingkan umur 21 hari (23,52 MPa) dengan selisih 0,25 MPa. Selisih tersebut sangat kecil dan perbedaan ini diduga dipengaruhi oleh variasi antar benda uji. Meskipun beton dibuat dengan campuran yang sama, tetapi kondisi setiap benda uji berbeda. Variasi ini dapat dipengaruhi oleh perbedaan kondisi masing-masing benda uji, tingkat kepadatan campuran, proses *curing*, maupun ketelitian dalam pengujian kuat tekan. Oleh karena itu penelitian disarankan menambah jumlah benda uji agar nilai rata-rata yang diperoleh lebih akurat. Secara keseluruhan, peningkatan nilai W/C menyebabkan kuat tekan beton geopolimer menurun akibat meningkatnya porositas sehingga struktur beton menjadi kurang padat. Sebaliknya, bertambahnya umur beton umumnya meningkatkan kuat tekan karena proses geopolimerisasi masih berlangsung sehingga pembentukan gel aluminosilikat semakin sempurna.

4. PERSAMAAN

Analisis Regresi

Analisis regresi dilakukan untuk mengetahui hubungan antara faktor air semen (W/C) sebagai variabel bebas (X) terhadap kuat tekan beton geopolimer sebagai variabel terikat (Y). Model regresi yang digunakan adalah regresi polinomial orde dua (kuadratik) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\hat{Y} = a + bX + cX^2$$

Dengan:

Y	=	Variabel *dependent*
X	=	Variabel *independent*
a	=	Konstanta regresi
b,c	=	Koefisien regresi
n	=	Jumlah data
Σ	=	Derajat kebebasan

Koefisien regresi dihitung menggunakan sistem persamaan normal sebagai berikut:

$$\Sigma Y = na + b\Sigma X + c\Sigma X^2$$
$$\Sigma XY = a\Sigma X + b\Sigma X + c\Sigma X^2$$
$$\Sigma X^2Y = a\Sigma X^2 + b\Sigma X^3 + c\Sigma X^4$$

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan data kuat tekan umur 14 hari, diperoleh nilai konstanta dan koefisien regresi sebagai berikut:

Tabel 10 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer

FAS	Kuat Tekan Beton (Mpa)		
	14 Hari	21 Hari	28 Hari
0,3	31,72	32,36	34,78
0,4	30,02	31,21	33,76
0,5	23,10	24,12	25,77
0,6	20,13	23,52	23,27

(Hasil analisis)

Tabel 10. menyajikan data hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer pada variasi W/C 0,3; 0,4; 0,5; dan 0,6 dengan umur pengujian 14, 21, dan 28 hari, yang selanjutnya digunakan sebagai data dalam analisis regresi polinomial.

Tabel 11 Perhitungan Analisis Regresi Polinomial (Kuadratik/Orde 2)

No	X	Y	Y^2	X^2	X^3	X^4	XY	X^2Y
1	0,3	31,72	1006,142	0,09	0,027	0,008	9,516	2,855
2	0,4	30,02	901,274	0,16	0,064	0,026	12,008	4,803
3	0,5	23,10	533,600	0,25	0,125	0,063	11,550	5,775
4	0,6	20,13	405,112	0,36	0,216	0,130	12,076	7,246
Total ∑	**1,8**	**104,968**	**2846,126**	**0,860**	**0,432**	**0,226**	**45,151**	**20,679**

(Hasil analisis)

Tabel 10 menyajikan perhitungan analisis regresi polinomial untuk menentukan hubungan antara faktor air semen (W/C) sebagai variabel bebas (XXX) dan kuat tekan beton geopolimer umur 14 hari sebagai variabel terikat (YYY).

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan data kuat tekan umur 14 hari, diperoleh nilai konstanta dan koefisien regresi sebagai berikut :

a = 38,955

b = -13,036

c = -31,847

Sehingga diperoleh persamaan regresi:

$$\hat{Y} = 38{,}955 - 13{,}036X + (-31{,}847X2)$$

Selanjutnya, tingkat hubungan model regresi dievaluasi menggunakan koefisien determinasi (R2) dengan persamaan:

$$R^2 = \frac{JK(b|a)}{\Sigma Y^2 - \frac{(\Sigma Y)^2}{n}}$$

Dengan :

$JK(b\|a)$	=	Jumlah kuadrat regresi
$JK(E)$	=	Jumlah kuadrat error
R^2	=	Koefisien determinasi
ΣXY	=	Jumlah produk X dan Y
ΣX^2Y	=	Jumlah produk X^2 dan Y

$$JK(b|a) = b\left(\Sigma XY - \frac{(\Sigma X)(\Sigma Y)}{n}\right) + c\left(\Sigma X^2Y - \frac{(\Sigma X^2)(\Sigma Y)}{n}\right)$$

$$= -13{,}036\left(45{,}151 - \frac{(1{,}8)(104{,}968)}{4}\right) \pm 31{,}847\left(20{,}679 - \frac{(0{,}860)(104{,}968)}{4}\right)$$

$$= 27{,}179 + 60{,}164$$

$$= 87{,}344$$

$$JK(E) = \Sigma Y^2 - \frac{(\Sigma Y)^2}{n}$$

$$= 2846{,}126 - \frac{11018{,}313}{4}$$

$$= 91{,}550$$

$$R^2 = \frac{JK(b|a)}{JK(E)}$$

$$R^2 = \frac{87{,}344}{91{,}550}$$

$$R^2 = 0{,}954$$

$$R = \sqrt{0{,}977}$$

$$= 0{,}977$$

5. KESIMPULAN

1. Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen portland mampu menghasilkan beton geopolimer dengan kuat tekan yang memenuhi target penelitian, sehingga berpotensi menjadi material pengikat alternatif yang lebih ramah lingkungan.
2. Variasi faktor air semen (W/C) berpengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis *fly ash*. Kuat tekan rata-rata tertinggi diperoleh pada variasi W/C 0,3 sebesar 34,78 MPa, sedangkan terendah pada W/C 0,6 sebesar 23,27 MPa, yang menunjukkan bahwa peningkatan nilai W/C cenderung menurunkan kuat tekan beton geopolimer.
3. Umur beton berpengaruh terhadap perkembangan kuat tekan beton geopolimer. Secara umum, kuat tekan meningkat seiring bertambahnya umur pengujian akibat berlangsungnya reaksi geopolimerisasi selama proses perawatan, dengan nilai optimum diperoleh pada umur 28 hari dan variasi W/C 0,3.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim ASTM-C117-2012. (2012). *Metode Uji Bahan Yang Lebih Halus dari Saringan 75 μm (No. 200) Dalam Agregat Mineral dengan Pencucian*.

Anonim ASTM C136-06. (2012). *Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar (ASTM C 136-06 , IDT)*.

Anonim ASTM C33-03. (n.d.). Standard Specifications For Concrete Aggregates. *2003*. https://doi.org/https://www.studocu.id/id/document/universitas-hasanuddin/civil-engginering/astm-c-33-standard-specification-for-concrete-aggregates/71475656

Anonim SNI 03-1971-2011. (2011). *Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan*.

Anonim SNI 03-2834-2000. (2000). *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*.

Anonim SNI 03-4428-1997. (1997). *Pemeriksaan Kadar Lumpur Pasir*. 1–10.

Anonim SNI 03-4804-1998. (1998). *Metode pengujian berat isi dan rongga udara dalam agregat*.

Anonim SNI 03-4810-1998. (1998). *Meotde Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton*. 1–8.

Anonim SNI 1969-2008. (2008). *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*.

Anonim SNI 1972-2008. (2008). *Cara uji slump beton*.

Anonim SNI 1974:2011. (2011). *Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder*.

Anonim SNI 2417-2008. (2008). *Cara uji keausan agregat dengan mesin abrasi Los Angeles*.

Anonim SNI 2460:2014. (2014). *Spesifikasi Abu Terbang Batu Bara dan Pozolan Alam Mentah Atau Yang Telah Dikalsinasi Untuk Digunakan Dalam Beton. (Standard Specification For Coal Fly Ash And Raw Or Calcined Natural Pozolan For Use In Concrete)*.

Anonim SNI 2493-2011. (2011). *Tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium*.

Awad, S. U. (2025). *STUDI PENELITIAN FAKTOR AIR SEMEN (W/C) PADA BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH*.

Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*. 131–149. https://doi.org/https://www.researchgate.net/publication/284651826_Properties_of_Geopolymer_Cements

Davidovits, P. J. (1991). *Geopolymer*. 6.

Good & Scates. (1954). *Hipotesis, Populasi dan Sampel Penelitian*.

Jusup F., Dermawan A., Efendi I. (2018). *Bahan Material Abu Terbang (Fly Ash)*. https://doi.org/https://www.scribd.com/presentation/377210101/Makalah-Fly-Ash

Naitkakin, F. A. M. A. S. (2025). *Studi Penelitian Faktor Air Semen Pada Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash (Batu Bara) Berdasarkan Kuat Tekan*.