

STUDI PENELITIAN KUAT TEKAN BETON GOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH* BERDASARKAN FAKTOR AIR *CEMENTITIOUS* (W/C) (AKTIVATOR: KALIUM HIDROKSIDA+NATRIUM SILIKAT)

Margareth Elisabeth Yegho¹, Mohammad Erfan², Vega Aditama³

¹Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Sigura-gura No 20

Email: grethyegho@gmail.com

² Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang, Perum Joyo Grand Kav. A-22 Malang

Email: Mohammaderfan@gmail.com

³² Jurusan Teknik Sipil, ITN Malang,

Email: vegaaditama@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to analyze the effect of variations in the water-to-cementitious (W/C) ratio on the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete using a mixed activator of 10 M potassium hydroxide (KOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃) at 3 and 7 days of curing age. The research was conducted with variations of the W/C ratio, namely 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, and 0.65. Fly ash was used as the main aluminosilicate material, while the alkaline activator consisted of a 10 M KOH solution and Na₂SiO₃ in a specific ratio. The samples were cast in cylindrical molds and cured at room temperature. The compressive strength test was carried out at 3 and 7 days of age. The results showed that variations in the W/C ratio significantly affected compressive strength. The highest compressive strength was obtained at a W/C of 0.35, with an average of 29.10 MPa at 3 days, increasing to 33.38 MPa at 7 days. Conversely, the W/C of 0.65 produced the lowest compressive strength, which was 17.68 MPa at 3 days and 23.19 MPa at 7 days. The 10 M KOH activator combined with Na₂SiO₃ proved effective in accelerating the formation of aluminosilicate bond structures, enabling early strength to be achieved in a short time. This study confirms that the water-to-cementitious (W/C) ratio has a significant effect on the compressive strength of geopolymer concrete, where a higher W/C ratio results in lower compressive strength.

Keywords: Geopolymer Concrete, Compressive Strength, Alkali Activator, Fly Ash, Water Cementitious Factor (W/C).

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi faktor air-cementitious (W/C) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis *fly ash* dengan aktivator campuran kalium hidroksida (KOH) 10 M dan natrium silikat (Na₂SiO₃) pada umur 3 dan 7 hari. Metode penelitian dilakukan dengan variasi faktor (W/C) yaitu 0,35; 0,40; 0,45; 0,50; 0,55; 0,60; dan 0,65. *Fly ash* digunakan sebagai material aluminosilikat utama, sedangkan aktivator alkali terdiri atas larutan KOH 10 M dan Na₂SiO₃ dengan rasio tertentu. Sampel dicetak berbentuk silinder, kemudian dilakukan curing pada suhu ruang. Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada umur 3 dan 7 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi faktor (W/C) berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada WC 0,35 dengan rata-rata 29,10 MPa pada umur 3 hari dan meningkat menjadi 33,38 MPa pada umur 7 hari. Sebaliknya, WC 0,65 menghasilkan kuat tekan terendah yaitu 17,68 MPa pada umur 3 hari dan 23,19 MPa pada umur 7 hari. Aktivator KOH 10 M bersama Na₂SiO₃ terbukti efektif mempercepat pembentukan struktur ikatan aluminosilikat, sehingga kekuatan awal (*early strength*) dapat dicapai dalam waktu singkat. Penelitian ini membuktikan bahwa terjadinya pengaruh yang signifikan Faktor air *cementitious* (W/C) terhadap kuat tekan beton yang mana, semakin tinggi (W/C) maka semakin rendah Kuat tekan beton yang di hasilkan.

Kata kunci : Beton geopolimer, Kuat Tekan, Alkali Aktivator, *Fly Ash*, Faktor Air *Cementitious* (W/C)

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material penting dalam Beton merupakan salah satu material utama yang penting

dalam bidang konstruksi yang umumnya tersusun atas agregat kasar, agregat halus, air dan semen. Untuk mengurangi dampak pemanasan global, salah satu

alternatif yang dapat diterapkan adalah penggunaan beton geopolimer, yaitu beton yang tidak memakai semen portland sebagai bahan pengikat, melainkan memanfaatkan *fly ash* sebagai bahan pengganti. *Fly ash* atau abu terbang adalah residu dari sisa pembakaran batu bara yang banyak dihasilkan dari PLTU. Kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) pada *fly ash* berfungsi sebagai pengikat setelah diaktifkan menggunakan larutan alkali *activator* berupa Kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) sehingga proses polimerisasi berlangsung lebih cepat. Sementara itu penelitian mengenai beton geopolimer sudah banyak dilakukan akan tetapi pada umumnya menggunakan kadar air pada beton normal. Pada dasarnya beton geopolimer tidak dapat menggunakan kadar air normal karena akan menyebabkan retak pada beton. Retak pada beton dipengaruhi karena jumlah kadar air yang berlebihan. Kadar air merupakan salah satu bagian penting dalam perhitungan rancang beton, karena nilai kadar air ini digunakan untuk menentukan kekuatan rencana beton..

2. METODOLOGI PENELITIAN

Makalah dapat ditulis baik dalam bahasa Indonesia maupun Inggris. Tulisan dalam pokok uraian menggunakan jenis huruf Times New Roman ukuran 10 pt, *justified*, 1 spasi, sebagaimana pada dokumen ini. Penulis diperbolehkan menggunakan huruf jenis lain untuk keperluan khusus misalnya untuk membedakan *source code* suatu program komputer.

Judul dari suatu *section* (*heading* dari *section*) ditulis dengan Times New Roman Capital 11pt, bold. Penomoran dimulai dengan angka 1, 2, 3, dst. Format paragraf *justified*, dan dalam satu halaman diusahakan rata atas dan bawah, sehingga sisa spasi dapat diatur oleh penulis. Penggantian alinea diberi jarak 1 spasi.

Tujuan penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui faktor air *cementitious* optimum (0,35- 0,65) terhadap beton geopolimer berbasis *fly ash* berdasarkan uji kuat tekan dan kuat tarik belah.

Tempat dan waktu penelitian

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional Malang. Analisis komposisi kimia *fly ash* dilakukan di Laboratorium Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang. Waktu penelitian berlangsung dari Maret 2025 hingga Juli 2025, mencakup tahap persiapan material, pembuatan benda uji (Silinder Ø15 x 30), perawatan, pengujian, dan analisis data

Populasi dan sampel

Dalam penelitian ini, keseluruhan objek yang diuji dapat dianggap sebagai populasi, sementara objek

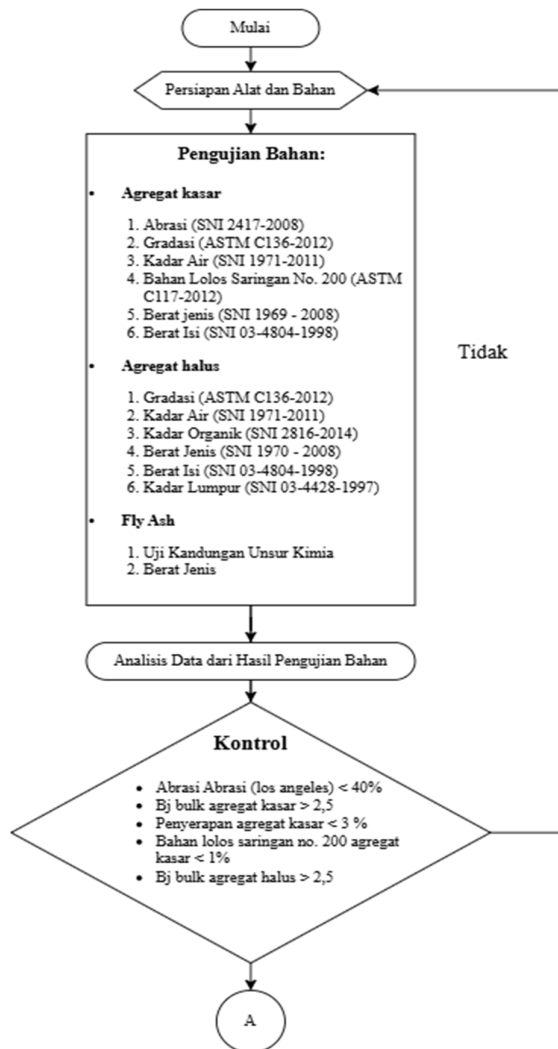
yang mewakili sebagian anggota populasi disebut sampel. Variasi campuran dan jumlah sampel (objek uji) ditentukan sebagai berikut:

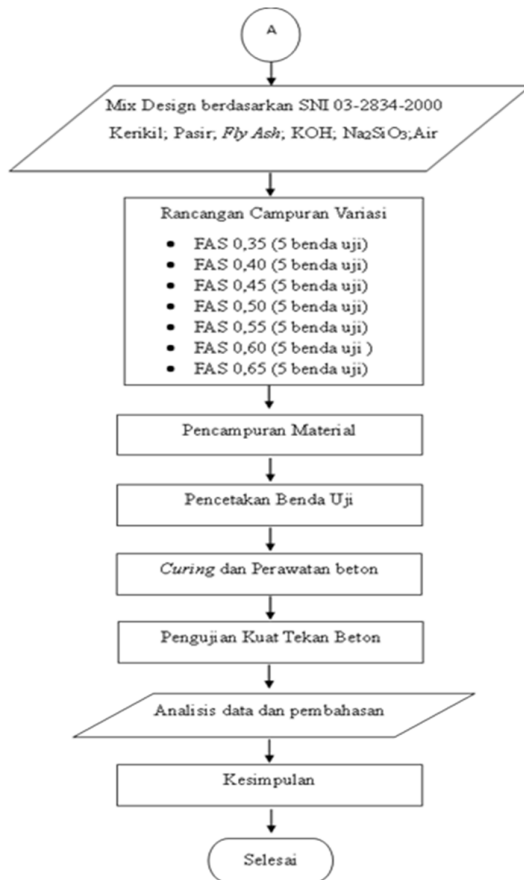
Tabel 1. Variasi Pengujian Beton

Jenis Pengujian	Umur Hari	Faktor air Cementitious (W/C)	Dimensi Sampel (cm)	Jumlah Sampel (Buah)	Total Sampel (Buah)
Kuat Tekan	3	0,35	Silinder 15x30	2	5
	7			3	
Kuat Tekan	3	0,4	Silinder 15x30	2	5
	7			3	
Kuat Tekan	3	0,45	Silinder 15x30	2	5
	7			3	
Kuat Tekan	3	0,5	Silinder 15x30	2	5
	7			3	
Kuat Tekan	3	0,55	Silinder 15x30	2	5
	7			3	
Kuat Tekan	3	0,6	Silinder 15x30	2	5
	7			3	
Kuat Tekan	3	0,65	Silinder 15x30	2	5
	7			3	

Diagram alir penelitian

Gambar 1. Diagram alir penelitian





3. ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian material campuran beton

Seluruh pengujian material yang dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Bangunan, Kampus 1, ITN Malang bertujuan untuk mengetahui mutu dan karakteristik agregat maupun semen sebagai bahan penyusun beton. Pemeriksaan meliputi berat isi, gradasi butiran, kadar lumpur, kadar air, berat jenis dan penyerapan agregat, serta konsistensi normal dan waktu ikat semen. Hasil dari pengujian ini menjadi dasar penting dalam menentukan proporsi campuran beton yang tepat agar diperoleh beton dengan sifat mekanis sesuai standar dan berkualitas baik.

Tabel 2. Rangkuman Hasil Pengujian Material

No.	Pengujian	Standar Acuan	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat Isi Agregat Kasar (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998			
	• Gembur		-	1,391	-
	• Padat		-	1,476	-
2	Berat Isi Agregat Halus (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998			
	• Gembur		-	1,658	-
	• Padat		-	1,759	-
3	Berat Isi Fly Ash (g/cm ³)	SNI 03-4804-1998			
	• Gembur		-	1,186	-
	• Padat		-	1,294	-

4	Analisis Saringan Agregat Kasar	SNI 03-1968-1990	-	Maks. 25mm	-
5	Analisis Saringan Agregat Halus	SNI 03-1968-1990	-	Zona 2	-
6	Bahan Lolos Saringan No.200 Agregat Halus (%)	SNI 03-4142-1996	Maks. 5	1,03	Memenuhi
7	Kadar Lumpur Agregat Halus (%)	SNI 03-4428-1997	Maks. 5	0,20	Memenuhi
8	Kadar Zat Organik Agregat Halus	SNI 2816:2014	-	Warna Cairan Bening	-
9	Kadar Air Agregat Kasar (%) • Asli • SSD	SNI 03-1971-1990		1,38 1,87	- -
10	Kadar Air Agregat Halus (%) • Asli • SSD	SNI 03-1971-1990	-	4,28 0,46	- -
11	BJ dan Penyerapan Agregat Kasar • Berat Jenis Bulk • Berat Jenis Ssd • Berat Jenis Apparent • Penyerapan (Absorpsi)	SNI 1970:2008	-	2,65 2,70 2,79 1,87	-
12	BJ dan Penyerapan Agregat Halus • Berat Jenis Bulk • Berat Jenis Ssd • Berat Jenis Apparent • Penyerapan (Absorpsi)	SNI 1969:2008	-	2,70 2,72 2,74 0,46	-
13	BJ Fly Ash	SNI 03-2531-1991	-	2,56	-
14	Abrasi (Los Angeles) %	SNI 2417 - 2008	Maks. 40	13,43	Memenuhi
15	Konsistensi dan Waktu Ikat Fly Ash • Waktu Ikat Awal (menit) • Waktu Ikat Akhir (menit)	SNI 15-2049-2004	Min. 23 Maks. 36		

Sumber: Hasil Analisis

Tabel 2. merangkum hasil pengujian karakteristik material beton yang meliputi agregat kasar, agregat halus, dan semen. Seluruh parameter memenuhi standar SNI, termasuk kadar lumpur, abrasi, dan waktu ikat. Material dinyatakan layak untuk digunakan dalam campuran beton.

Perencanaan campuran (mix design)

Metode desain campuran beton yang digunakan dalam penelitian ini adalah SNI 03-2834-2000 (tata cara rencana campuran beton normal) dan SNI 2847-2013/2019 untuk menyesuaikan parameter geopolimer agar hasil campurannya dapat memenuhi kriteria SNI yang relevan terkait Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal.

Sebelum memulai tahap perhitungan untuk mendapatkan jumlah komposisi campuran, ada beberapa hal yang harus diperhatikan saat merancang campuran beton. Salah satunya adalah bahwa campuran harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan.

Tabel 4. Kondisi Akhir Campuran Beton Geopolimer
Kondisi Lapangan

Jumlah Bahan	Faktor Air Cementitious (W/C)							Total
	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	
Fly Ash (Kg)	18,48	16,17	14,37	12,94	11,76	10,78	9,95	94,45
Agregat Halus (Kg)	21,49	23,03	24,34	25,62	26,79	27,82	28,88	177,96
Agregat Kasar (Kg)	32,29	33,11	33,65	33,85	33,90	33,88	33,70	234,37
KOH (L)	5,32	5,36	5,40	5,43	5,46	5,49	5,52	37,99
Na ₂ SiO ₃ (L)	1,77	1,79	1,80	1,81	1,82	1,83	1,84	12,66

Sumber: Hasil Analisis

Pembuatan dan perawatan benda uji

Persiapan material dan bekisting

Persiapan *fly ash*, agregat halus, agregat kasar, dan larutan alkali dilakukan dengan menimbang sesuai kebutuhan masing-masing variasi presentase serat. Persiapan pembuatan larutan KOH 10 (M) dilakukan sehari sebelum pengecoran dikarenakan KOH membutuhkan waktu 24 jam untuk larut sempurna dan mencapai keseimbangan konsentrasi atau molaritas. Persiapan bekisting dilakukan dengan dibersihkan menggunakan sikat baja agar tidak ada sisa dari pengecoran sebelumnya dan dioleskan pelumas ke seluruh bekisting.

Pencampuran dan pencetakan benda uji

Pencampuran beton geopolimer dilakukan manual karena cepat mengeras. Larutan KOH dan Na₂SiO₃ dicampur terlebih dahulu, lalu agregat (batu kecil, batu besar, abu terbang, dan serat aluminium) diaduk terpisah. Larutan aktivator ditambahkan sedikit demi sedikit sambil diaduk hingga homogen, kemudian dilakukan uji slump untuk mengetahui kekentalan. Campuran dituang ke bekisting yang sudah dilapisi oli bekas, lalu dipadatkan dengan penusukan besi 25 kali tiap lapisan agar udara hilang. Setelah pengecoran, benda uji diberi tanda, dibuka bekistingnya setelah ±24 jam, lalu dirawat pada suhu ruang selama 7 hari sesuai kebutuhan uji.

Perawatan benda uji

Setelah ±24 jam, benda uji dikeluarkan dari bekisting dan didiamkan di suhu ruang selama 3 dan 7 hari, sesuai kebutuhan uji. Lalu benda uji diuji kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat tarik lentur.

Pengujian slump beton geopolimer

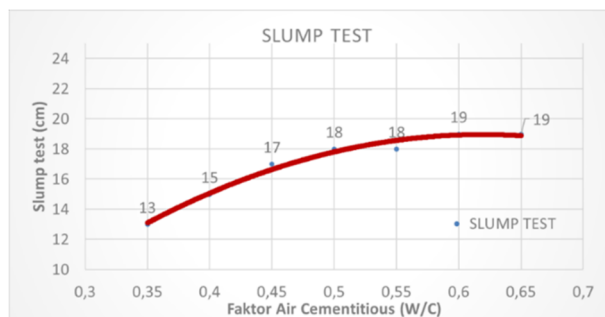
Pengujian slump beton digunakan untuk mengetahui ukuran derajat kemudahan dalam pengecoran adukan beton segar, berikut merupakan hasil pengujian slump yang dilakukan pada masing-masing variasi campuran beton serat.

Tabel 5. Hasil Uji Slump

Kode	Slump (cm)
0,35	13
0,4	15
0,45	17
0,5	18
0,55	18
0,6	19
0,65	19

Sumber: Hasil Analisis

Dari data diatas kemudian diolah menggunakan program bantu MS Excel sehingga menghasilkan grafik seperti dibawah ini:



Gambar 2. Grafik Hubungan Nilai Slump Dengan Faktor Air Cementitious (W/C)

Sumber: Hasil Penelitian

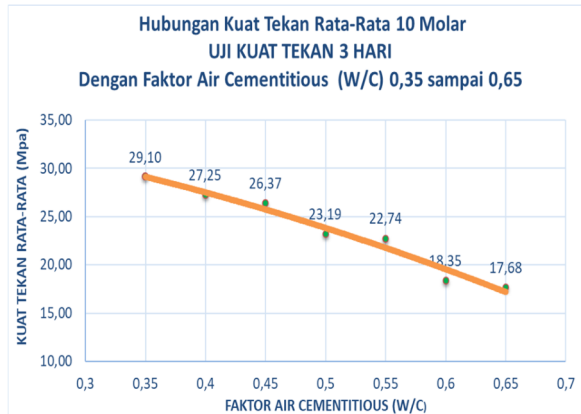
Analisis data kuat tekan

Hasil uji kuat tekan silinder diperoleh dari hasil sampel uji dengan masing-masing variasi Faktor air cementitious 0,35-0,65

Tabel 6. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Silinder Umur 3 Hari 15 x 30

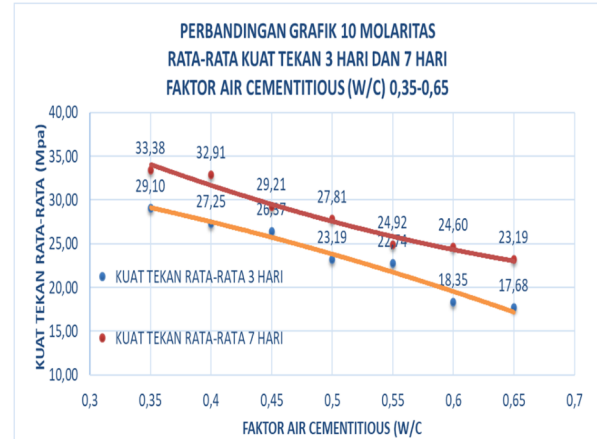
No	Variasi FAS (10 MOLARITAS)	Kode	Tanggal Buat	Tanggal Test	Umur (Hari)	Tekanan Hancur (KN)	Tekanan Hancur ril (Mpa)	Tekanan Hancur Rata-rata (Mpa)
1	0,35	1	14 juni 2025	17 Juni 2025	3	543	31	29,10
2		2	14 juni 2025	17 Juni 2025		482	27	
3	0,4	5	14 juni 2025	17 Juni 2025	3	489	28	27,25
4		6	14 juni 2025	17 Juni 2025		468	26	
5	0,45	3	14 juni 2025	17 Juni 2025	3	456	26	26,37
6		4	14 juni 2025	17 Juni 2025		477	27	
7	0,5	7	14 juni 2025	17 Juni 2025	3	366	21	23,19
8		8	14 juni 2025	17 Juni 2025		456	26	
9	0,55	9	15 juni 2025	18 Juni 2025	3	429	24	22,74
10		10	15 juni 2025	18 Juni 2025		377	21	
11	0,6	11	15 juni 2025	18 Juni 2025	3	199	11	18,35
12		12	15 juni 2025	18 Juni 2025		456	26	
13	0,65	13	15 juni 2025	18 Juni 2025	3	312	18	17,68
14		14	15 juni 2025	18 Juni 2025		313	18	

Sumber: Hasil Analisis



Gambar 3. Grafik Hubungan Kuat Tekan Rata-Rata Umur 3 Hari Dengan Faktor Air *Cementitious* (W/C) 0,35 sampai 0,65

Sumber: Hasil Penelitian



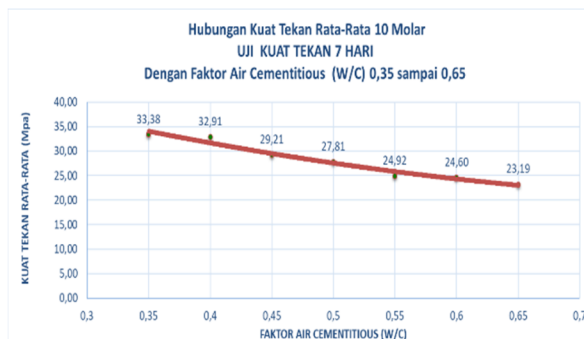
Gambar 5. Grafik Hubungan Kuat Tekan Rata-Rata Umur 7 Hari Dengan Faktor Air *Cementitious* (W/C) 0,35 sampai 0,65

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 7. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Silinder Umur 7 Hari 15 x 30

No	Variasi FAS (10 MOLARITAS)	Kode	Tanggal Buat	Tanggal Test	Umur (Hari)	Tekanan Hancur (KN)	Tekanan Hancur ril (Mpa)	Tekanan Hancur Rata-rata (Mpa)
1	0,35	15	14 Juni 2025	21 Juni 2025	7	570	32	33,38
2		16	14 Juni 2025	21 Juni 2025		589	33	
3		17	14 Juni 2025	21 Juni 2025		606	34	
4	0,4	18	14 Juni 2025	21 Juni 2025	7	605	34	32,91
5		19	14 Juni 2025	21 Juni 2025		538	30	
6		20	14 Juni 2025	21 Juni 2025		619	35	
7	0,45	21	14 Juni 2025	21 Juni 2025	7	539	31	29,21
8		22	14 Juni 2025	21 Juni 2025		472	26	
9		23	14 Juni 2025	21 Juni 2025		546	31	
10	0,5	24	14 Juni 2025	21 Juni 2025	7	522	29	27,81
11		25	14 Juni 2025	21 Juni 2025		464	26	
12		26	14 Juni 2025	21 Juni 2025		501	28	
13	0,55	27	15 Juni 2025	22 Juni 2025	7	397	22	24,92
14		28	15 Juni 2025	22 Juni 2025		464	26	
15		29	15 Juni 2025	22 Juni 2025		476	27	
16	0,6	30	15 Juni 2025	22 Juni 2025	7	383	21	24,60
17		31	15 Juni 2025	22 Juni 2025		479	27	
18		32	15 Juni 2025	22 Juni 2025		454	26	
19	0,65	33	15 Juni 2025	22 Juni 2025	7	430	24	23,19
20		34	15 Juni 2025	22 Juni 2025		406	23	
21		35	15 Juni 2025	22 Juni 2025		415	23	

Sumber: Hasil Analisis



Gambar 4. Grafik Hubungan Kuat Tekan Rata-Rata Umur 7 Hari Dengan Faktor Air *Cementitious* (W/C) 0,35 sampai 0,65

Sumber: Hasil Penelitian

4. PERSAMAAN

Analisis regresi

Persamaan Berikut ini perhitungan regresi dilakukan pada data kekuatan tekan beton geopolimer. Nilai X yang digunakan dalam penelitian ini adalah Tingkat variasi faktor air *cementitious* (W/C). Persamaan yang digunakan yaitu persamaan ekponensial. Berikut ini perhitungan regresi dilakukan pada data kekuatan tekan beton geopolimer. Nilai X yang digunakan dalam penelitian ini adalah Tingkat variasi faktor air *cementitious* (W/C).

Model awal rumus ekponensial adalah

$$y = a \cdot e^{bx}$$

agar bisa dihitung dengan regresi linear biasa, kedua sisi di-log natural-kan menjadi :

$$\ln y = \ln a + bx$$

Dimana :

$\ln y$ kita sebut Y

$\ln a$ kita sebut α (intersep)

b adalah koefisien kemiringan (slope)

Sehingga bentuknya :

$$Y = \alpha + bx$$

Dimana :

b = koefisien kemiringan

α = nilai konstanta (nilai y saat $x = 0$)

e = bilangan Euler

n = jumlah data

$\sum (x \cdot Y)$ = jumlah hasil kali x dan $\ln y$ per baris data

$\sum x$ = jumlah semua nilai x

$\sum Y$ = jumlah semua nilai $\ln y$

$\sum x^2$ = jumlah kuadrat x

R^2 = Koefisien determinasi

SST = Total Variansi

SSE = Jumlah Kuadrat Error (Kesalahan)

Tabel 8. Data Perhitungan y Estimasi ($\hat{y}_i$)

NO	x	y_i	$\hat{y}_i$ (Estimasi) $55.254 \cdot e^{(-1.739X)}$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	0,35	29,10	30,06	0,93
2	0,4	27,25	27,56	0,09
3	0,45	26,37	25,26	1,22
4	0,5	23,19	23,16	0,00
5	0,55	22,74	21,23	2,27
6	0,6	18,35	19,46	1,24
7	0,65	17,68	17,84	0,03
Total (Σ)	3,5	164,67	0,13	5,79

Sumber: Hasil Analisa Penelitian

Mengidentifikasi koefisien (R^2):

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

Rata-rata Nilai $\bar{y}_i = \frac{164,67}{7} = 23,52$

Mencari nilai SST (Total Variansi)

$$\begin{aligned} SST &= \sum (y_i - \bar{y}_i)^2 \\ &= (29,10 - 23,52)^2 + (27,25 - 23,52)^2 + (26,37 - 23,52)^2 + (23,19 - 23,52)^2 + (22,74 - 23,52)^2 + (18,35 - 23,52)^2 + (17,68 - 23,52)^2 \end{aligned}$$

$$SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

$$= 5,79$$

$$R^2 = 1 - \frac{5,79}{114,75}$$

$$= 0,9506$$

$$R = \sqrt{0,9506}$$

$$= 0,9750$$

Dimana:

$\bar{y}_i$ = Nilai rata-rata y_i

$\hat{y}_i$ = Nilai y_i estimasi

R = Koefisien korelasi

5. KESIMPULAN

Setelah melakukan Analisa dari hasil penelitian, maka dapat dilakukan kesimpulan dari factor air *cementitious* (W/C) 0,35 sampai 0,65 pada beton geopolymer berbasis *fly ash* berdasarkan kuat tekan, sebanding dengan rumusan masalah yakni:

1. Berdasarkan Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer pada faktor air *cementitious* W/C 0,35- 0,65 terdapat pengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer dimana Mutu yang dihasilkan yaitu W/C 0,35 sebesar 33,38 MPa, W/C 0,4 sebesar 32,91 MPa, W/C 0,45 sebesar 29,21 MPa, W/C 0,5 sebesar 27,81 MPa, W/C 0,55 sebesar 24,92 MPa, W/C 0,6 sebesar 24,60 MPa, W/C 0,65 sebesar 23,19 Mpa. Maka dapat disimpulkan semakin tinggi nilai W/C, maka semakin rendah mutu (kuat tekan) beton geopolimer yang dihasilkan
2. Berdasarkan hasil analisa grafik hubungan antara mutu beton dengan faktor air *cementitious* (W/C), menunjukkan kemiripan lengkungan dengan grafik beton normal dan menunjukkan pola penurunan nilai kuat tekan. Kemudian, dari hasil pengujian kuat tekan tersebut dibuatkan kurva non-linear atau kurva regresi. Berdasarkan analisa kurva tersebut, dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai W/C, maka semakin rendah mutu (kuat tekan) beton geopolimer yang dihasilkan. Hal ini disebabkan karena semakin tingginya kadar air dalam campuran akan menurunkan kerapatan struktur geopolimer, mengurangi ikatan polimerisasi, dan meningkatkan porositas beton, sehingga kekuatan mekaniknya menurun secara signifikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. (2000). SNI 03-2834-2000 *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Anonim. (2002b). SNI 03-2847-2002 *Perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.

- Anonim. (2011). *Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Anonim. (2014). SNI - 2460-2014 - *Spesifikasi Abu Terbang Batu Bara Dan Pozolan*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
<https://id.scribd.com/document/396332629/SNI-2460-2014-Spesifikasi-Abu-Terbang-Batu-Bara-Dan-Pozolan#>
- Aziz Mathofani, 2023. (2023). *Pengaruh penggunaan abu ampas tebu dan silica fume terhadap kekuatan beton geopolimer berbasis fly ash*.
- Davidovits. (1994). Properties of Geopolymer Cements. *First International Conference on Alkaline Cements and Concretes., October 1994*, 131–149.
- Fadhil Muhammad Fajri, R. Jachrizal Sumabrata, 2019. (2019). *Pemanfaatan Abu Terbang (Fly-Ash) Dan Silica Fume Sebagai Bahan Utama Geopolimer Alternatif Pengganti Semen Tradisional (Opc). Prosiding Simposium II -UNIID 2019, 1978(September)*, 450–456.
- Januarti Ekaputri. (2013). Sodium sebagai Aktivator Fly Ash, Trass dan Lumpur Sidoarjo dalam Beton Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil*, 20(1), 1.
<https://doi.org/10.5614/jts.2013.20.1.1>
- Mira Setiawati, 2019. (2019). Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2019*, 1–8.
- Muhammad Pradata Achlam, 2023. (2023). *Metodologi Penelitian: Metodologi penelitian Skripsi*. Rake Sarasin, 1–67.
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). *Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolimer and OPC cement concrete*. Turner & Collins, 43, 125–130.
- Walpole R. E. (1998). Pengantar Statistika, edisi ke 3, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Wardhono. (2019). *Pengaruh Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang Kelas C. Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, 1(1), 1.
<https://doi.org/10.26740/proteksi.v1n1.p1-7>