PENGARUH WATER-TO-CEMENTITIOUS RATIO TERHADAP KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH TIPE BERAKTIVATOR KOH-Na_2SiO_3

Elfege Aprilio Ba Dia Tobong[1], Mohammad Erfan[2], dan Vega Aditama[3]

[1]Program Studi Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malang
Email: elfegeee5@gmail.com
[2] Program Studi Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malang
Email: mohammaderfan@ftsp.itn.ac.id
[3] Program Studi Teknik Sipil S-1, Institut Teknologi Nasional Malang
Email: vegaaditama@gmail.com

ABSTRACT

The construction industry is one of the major contributors to carbon dioxide (CO_2) emissions due to the extensive use of Portland cement. Geopolymer concrete utilizing Type C fly ash has emerged as a sustainable alternative binder because it incorporates aluminosilicate-rich industrial by-products activated by alkaline solutions. This study investigated the effect of the water-to-cementitious ratio (W/C) on the compressive strength of Type C fly ash-based geopolymer concrete activated with potassium hydroxide (KOH) and sodium silicate (Na_2SiO_3). Four W/C ratios (0.30, 0.40, 0.50, and 0.60) were evaluated using cylindrical specimens measuring 100 × 200 mm. Compressive strength tests were conducted at curing ages of 14, 21, and 28 days in accordance with SNI 1974:2011. Preliminary material characterization included bulk density, sieve analysis, specific gravity, water absorption, moisture content, normal consistency, and setting time. The experimental data were analyzed using confidence interval, exponential regression, and correlation analyses. The results indicated that increasing the W/C ratio increased the slump value but decreased the compressive strength of geopolymer concrete at all curing ages. Conversely, lower W/C ratios produced higher compressive strength, with the highest value obtained at a W/C ratio of 0.30 and the lowest at 0.60. In addition, compressive strength consistently increased with curing age, indicating continuous strength development up to 28 days. These findings demonstrate that the water-to-cementitious ratio significantly influences the mechanical performance of Type C fly ash-based geopolymer concrete and should be carefully controlled to achieve optimum compressive strength.

Keywords: compressive strength; fly ash Type C; geopolymer concrete; potassium hydroxide; sodium silicate; water-to-cementitious ratio.

ABSTRAK

Industri konstruksi merupakan salah satu penyumbang utama emisi karbon dioksida (CO_2) akibat penggunaan semen Portland yang sangat tinggi. Beton geopolimer berbasis fly ash tipe C menjadi salah satu alternatif material ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah industri yang kaya akan silika dan alumina serta diaktivasi menggunakan larutan alkali. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh water-to-cementitious ratio (W/C) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash tipe C dengan aktivator kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3). Variasi nilai W/C yang digunakan yaitu 0,30; 0,40; 0,50; dan 0,60 dengan benda uji berbentuk silinder berukuran 100 × 200 mm. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 14, 21, dan 28 hari sesuai SNI 1974:2011. Karakterisasi material meliputi berat isi, analisis saringan, berat jenis, penyerapan air, kadar air, konsistensi normal, dan waktu ikat. Data hasil penelitian dianalisis menggunakan uji interval kepercayaan, regresi eksponensial, dan analisis korelasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan nilai W/C menyebabkan nilai slump meningkat, namun kuat tekan beton geopolimer menurun pada seluruh umur pengujian. Sebaliknya, nilai W/C yang lebih rendah menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi, dengan kuat tekan maksimum diperoleh pada W/C 0,30 dan minimum pada W/C 0,60. Selain itu, kuat tekan meningkat secara konsisten seiring bertambahnya umur beton hingga 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa water-to-cementitious ratio memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kinerja mekanik beton geopolimer berbasis fly ash tipe C sehingga pengendalian nilai W/C menjadi faktor penting untuk memperoleh kuat tekan yang optimum.

Kata kunci: beton geopolimer; fly ash tipe C; kalium hidroksida; kuat tekan; natrium silikat; water-to-cementitious ratio.

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan salah satu material utama yang banyak digunakan dalam bidang konstruksi karena memiliki kuat tekan yang tinggi, mudah dibentuk, serta mampu memenuhi berbagai kebutuhan struktur bangunan. Pada umumnya, beton tersusun atas semen Portland, agregat halus, agregat kasar, dan air sebagai bahan penyusun utama. Namun, produksi semen Portland menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah besar yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Oleh karena itu, diperlukan inovasi material konstruksi yang lebih ramah lingkungan untuk mengurangi penggunaan semen Portland tanpa mengurangi kinerja beton. Salah satu alternatif yang dapat diterapkan adalah beton geopolimer, yaitu beton yang tidak menggunakan semen Portland sebagai bahan pengikat, melainkan memanfaatkan fly ash sebagai material utama. Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dalam jumlah tinggi. Kandungan tersebut dapat bereaksi melalui proses geopolimerisasi setelah diaktivasi menggunakan larutan alkali berupa kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3), sehingga membentuk material pengikat yang memiliki sifat mekanik menyerupai semen. Penelitian mengenai beton geopolimer telah banyak dilakukan dengan berbagai variasi material penyusun maupun komposisi larutan aktivator. Namun, penelitian mengenai pengaruh water-to-cementitious ratio (W/C) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash tipe C masih relatif terbatas. Padahal, nilai W/C merupakan salah satu parameter penting dalam perancangan campuran beton karena memengaruhi karakteristik beton segar serta perkembangan kuat tekan beton pada berbagai umur pengujian. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi water-to-cementitious ratio (W/C) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash tipe C yang diaktivasi menggunakan larutan kalium hidroksida (KOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3).

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi Faktor Air Semen (FAS) sebesar 0,30; 0,40; 0,50; dan 0,60 serta pengaruh umur beton (14, 21, dan 28 hari) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash tipe C.

Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium strukur dan bahan, program studi Teknik sipil, Intitut Teknologi Nasional Malang. Pengujian material meliputi karakteristik agregat, konsistensi normal, waktu ikat, slump dan kuat tekan beton geopolimer.

Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Mei sampai Juni 2026, yang meliputi persiapan material, pengujian karakteristik bahan, pembuatan benda uji, proses curing, pengujian slump, pengujian kuat tekan beton, pengolahan data, serta analisis hasil penelitian.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium untuk menganalisis pengaruh water-to-cementitious ratio (W/C) terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash tipe . Beton geopolimer dibuat menggunakan fly ash tipe C sebagai bahan pengikat yang dikativasi dengan larutan kalium hidroksida (KOH) 10M dan Natrium Silikat (Na2SiO3). Variasi nilai water-to-cementitious ratio yang digunakan yaitu 0,3;0,4;0,5;0,6, sedangkan rasio larutan activator ditentukan terlebih dahulu melalui pengujian konsistensi normal dan waktu ikat. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 14,21 dan 28 hari.

Jumlah Sampel

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berdiameter 100 x 200 mm. Setiap variasi water-to-cementitious ratio diuji pada umur 14,21 dan 28 hari dengan tiga benda uji untuk setiap umur pengujian sehingga total benda uji yang digunakan sebanyak 36 sampel.

Alat dan Bahan

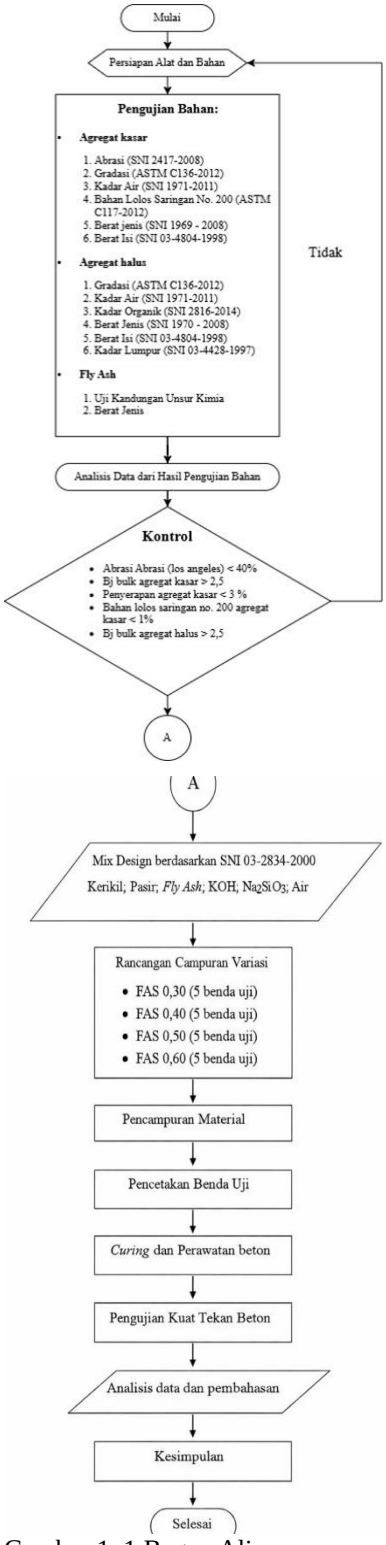
Penelitian ini menggunakan berbagai peralatan laboratorium untuk pembuatan dan pengujian beton geopolimer. Material penyusum terdiri atas fly ash tipe C, agregat halus, agregat kasar, larutan kalium hidroksida (KOH) 10M, natrium silikat (Na2SiO3) dan air. Adapun alat yang digunakan adalah Compression Testing Machine, Slump Cone, Concrete Mixer, Cetakan Silinder, Tombangan Digital, Oven, Ayakan, mistar baja, alat penusuk, peralatan pendukung.

Metode Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh melalui pengujian laboratorium yang meliputi karakteristik material penyusun, pengujian konsistensi normal, waktu ikat, slump, dan kuat tekan beton geopolimer. Seluruh pengujian dilakukan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang relevan. Data hasil pengujian

selanjutnya dianalisis menggunakan interval kepercayaan, regresi eksponensial, dan analisis korelasi untuk mengetahui hubungan antara water-to-cementitious ratio dan kuat tekan beton geopolimer.

Bagan Alir



Gambar 1. 1 Bagan Alir

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

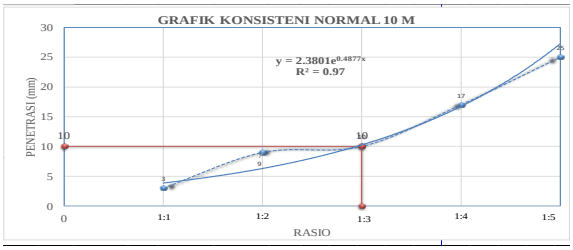
Pengujian Waktu Ikat dan Konsistensi Normal

Pengujian konsistensi normal dan waktu ikat dilakukan menggunakan beberapa variasi rasio KOH : Na_2SiO_3 guna menentukan komposisi larutan aktivator yang optimum sebelum digunakan pada campuran beton geopolymer.

Tabel 1. 1 Komposisi KOH : Na2SiO3

Rasio	KOH	Na2SiO3	Air	Penetrasi (mm)
Rasio 1:1	21.04	21.04	32.92	3
Rasio 1:2	14.03	28.05	32.92	9
Rasio 1:3	10.52	31.56	32.92	10
Rasio 1:4	8.42	33.66	32.92	17
Rasio 1:5	7.01	35.07	32.92	25

(Sumber : Hasil Penlitian)



(Sumber : Hasil Penlitian)

Gambar 1. 2 Grafik Konsistensi Normal

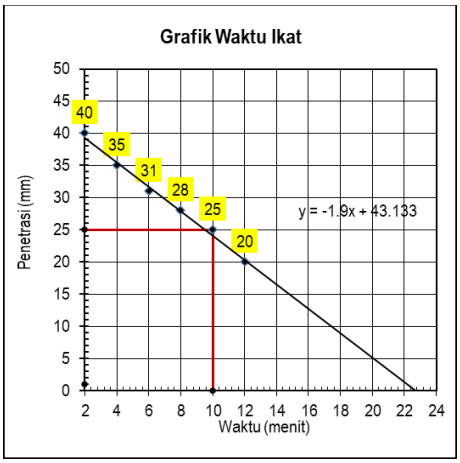
Pengujian konsistensi normal dan waktu ikat dilakukan menggunakan beberapa variasi rasio KOH : Na_2SiO_3 untuk memperoleh komposisi larutan aktivator yang optimum. Berdasarkan hasil pengujian, rasio KOH : Na_2SiO_3 sebesar 1:3 dengan komposisi 10,52 gram : 31,56 gram menghasilkan nilai penetrasi 10 mm sehingga memenuhi persyaratan konsistensi normal sebesar 10 ± 1 mm. Oleh karena itu, rasio tersebut digunakan pada seluruh campuran beton geopolimer.

Tabel 1. 2 Tabel Waktu Ikat

Awal		
No.	Waktu (menit)	Penetrasi (mm)
1	2	40
2	4	35
3	6	31
4	8	28
5	10	25
6	12	20
7	14	Berbekas
8	16	Berbekas
9	18	Berbekas
10	20	Berbekas
11	22	Berbekas
12	24	Tidak Berbekas
Akhir		
24		

(Sumber: Hasil Penelitian)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pada menit ke-10 nilai penetrasi mencapai 25 mm, sedangkan pada menit ke-24 pasta sudah tidak meninggalkan bekas penetrasi, yang menunjukkan proses pengikatan telah berlangsung sempurna.



(Sumber : Hasil Penelitian)
Gambar 1. 3 Grafik Konsistensi Normal

Pengujian Material

Hasil pengujian material disajikan pada tabel berikut:

Tabel 1. 3 Hasil Pengujian Material

No	Pengujian	Standar Acuan	Spesifikasi	Hasil	Keterangan
1	Berat isi agregat kasar (g/cm^3) Gembur Padat	SNI 03-4804-1998	 - -	 1,43 1,51	 - -
2	Berat isi agregat halus (g/cm^3) Gembur Padat	SNI 03-4804-1998	 - -	 1,59 1,68	 - -
3	Berat isi *fly ash* (g/cm^3) Gembur Padat	SNI 03-4804-1998	 - -	 1,19 1,30	 - -
4	Analisis Saringan Ageregat Kasar	SNI 03-1968-1990	-	Maks 20 mm	-
5	Analisis Saringan Ageregat Halus	SNI 03-1968-1990	-	Zona 2	-
6	Bahan lolos saringan No. 200 Agregat Halus (%)	SNI 03-4142-1996	Maks 5	0,40	Memenuhi
7	Bahan lolos saringan No. 200 Agregat Kasar (%)	SNI 03-4428-1997	Maks 5	0,20	Memenuhi
8	Kadar Zat Organik Agregat Halus	SNI 2816-2014	-	Kuning Muda	-
9	Kadar Air Agregat Kasar (%) Asli SSD	SNI 03-1971-1990	 - -	 23,08 22,31	 - -
10	Kadar Air Agregat Halus (%) Asli SSD	SNI 03-1971-1990	 - -	 10,57 10,17	 - -
11	BJ dan Penyerapan Agregat Kasar Berat Jenis Bulk Berat Jenis SSD Berat Jenis Apparent Penyerapan (Absorbsi)	SNI 1969-2008	-	 2,67 2,71 2,79 1,62	-
12	BJ dan Penyerapan Agregat Halus Berat Jenis Bulk Berat Jenis SSD Berat Jenis Apparent Penyerapan (Absorbsi)	SNI 1969-2008	-	 2,68 2,70 2,74 0,88	-
13	BJ Fly Ash	SNI 03-2531-1991	-	2,74	-
14	Abrasi	SNI 2417-2008	Maks. 40	12,93	Memenuhi
15	Konsistensi dan Waktu Ikat *Fly ash* Waktu ikat awal (menit) Waktu ikat akhit (menit)	SNI 15-2049-2004	 Min. 23 Maks. 36	 10,00 24,00	

(Sumber : Hasil Penlitian)

Slump Test

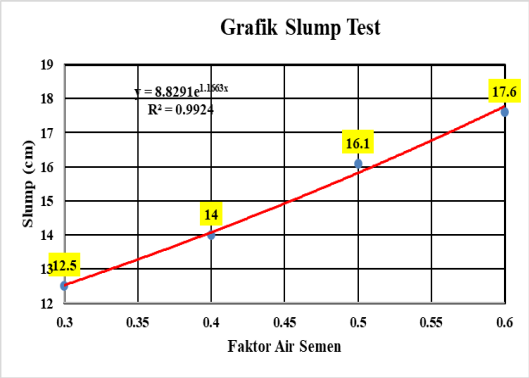
Hasil slump test disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 1. 4 Hasil Pengujian Slump

Faktor Air	Slump (cm)
0.3	12.5
0.4	14
0.5	16.1
0.6	17.6

(Sumber : Hasil Penlitian)

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai slump meningkat seiring dengan bertambahnya nilai Faktor Air Semen (FAS). Semakin tinggi nilai FAS yang digunakan, semakin tinggi pula nilai slump yang dihasilkan, sehingga menunjukkan peningkatan kemudahan pengerjaan (workability) campuran beton geopolimer.



(Sumber : Hasil Penlitian)

Gambar 1. 4 Grafik Pengujian Slump

Gambar 1.4 menunjukkan bahwa peningkatan nilai Faktor Air Semen (FAS) diikuti dengan peningkatan nilai slump. Nilai slump bertambah dari 12,5 cm menjadi 17,6 cm pada variasi FAS 0,30 hingga 0,60.

Hasi Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton dilakukan menggunakan Compression Testing Machine (CTM) sesuai SNI 1974:2011. Nilai kuat tekan beton dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$fc : \frac{P}{A}$$

Dimana :

Fc : Kuat tekan beton (Mpa)

P : Beban maksimu (N)

A : Luas penampang benda uji (mm^2)

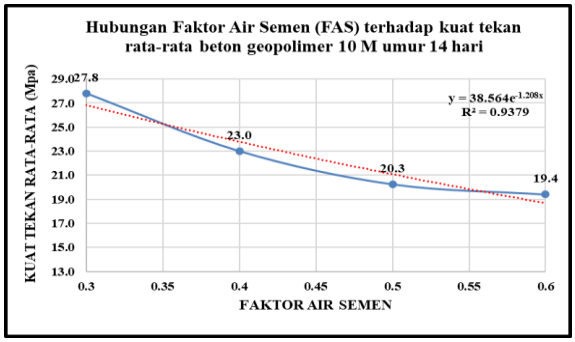
Hasil pengujian kuat tekan beton geopolymer 10M disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 1. 5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer

NO	FAS	Tanggal Cor	Tanggal Uji	umur	Tekan Hancur	Beban Maksimum	Area Penampan	Tekan Hancur Rill	Tekan Hancur Rata-rata
1					260	260000	7850	33.12	
2	0.3	5/5/2026	5/19/2026	14	201	201000	7850	25.61	27.81
3					194	194000	7850	24.71	
4					284	284000	7850	36.18	
5	0.3	5/5/2026	5/26/2026	21	232	232000	7850	29.55	31.04
6					215	215000	7850	27.39	
7					250	250000	7850	31.85	
8	0.3	5/5/2026	6/2/2026	28	305	305000	7850	38.85	34.10
9					248	248000	7850	31.59	
NO	FAS	Tanggal Cor	Tanggal Uji	umur	Tekan Hancur	Beban Maksimum	Area Penampan	Tekan Hancur Rill	Tekan Hancur Rata-rata
1					183	183000	7850	23.31	
2	0.4	5/6/2026	5/20/2026	14	179	179000	7850	22.80	23.01
3					180	180000	7850	22.93	
4					204	204000	7850	25.99	
5	0.4	5/6/2026	5/27/2026	21	198	198000	7850	25.22	25.56
6					200	200000	7850	25.48	
7					234	234000	7850	29.81	
8	0.4	5/6/2026	6/3/2026	28	246	246000	7850	31.34	30.40
9					236	236000	7850	30.06	
NO	FAS	Tanggal Cor	Tanggal Uji	umur	Tekan Hancur	Beban Maksimum	Area Penampan	Tekan Hancur Rill	Tekan Hancur Rata-rata
1					161	161000	7850	20.51	
2	0.5	5/7/2026	5/21/2026	14	157	157000	7850	20.00	20.25
3					159	159000	7850	20.25	
4					192	192000	7850	24.46	
5	0.5	5/7/2026	5/28/2026	21	191	191000	7850	24.33	23.95
6					181	181000	7850	23.06	
7					212	212000	7850	27.01	
8	0.5	5/7/2026	6/4/2026	28	207	207000	7850	26.37	27.01
9					217	217000	7850	27.64	
NO	FAS	Tanggal Cor	Tanggal Uji	umur	Tekan Hancur	Beban Maksimum	Area Penampan	Tekan Hancur Rill	Tekan Hancur Rata-rata
1					155	155000	7850	19.75	
2	0.6	5/8/2026	5/22/2026	14	153	153000	7850	19.49	19.41
3					149	149000	7850	18.98	
4					159	159000	7850	20.25	
5	0.6	5/8/2026	5/29/2026	21	172	172000	7850	21.91	20.93
6					162	162000	7850	20.64	
7					195	195000	7850	24.84	
8	0.6	5/8/2026	6/5/2026	28	198	198000	7850	25.22	25.10
9					198	198000	7850	25.22	

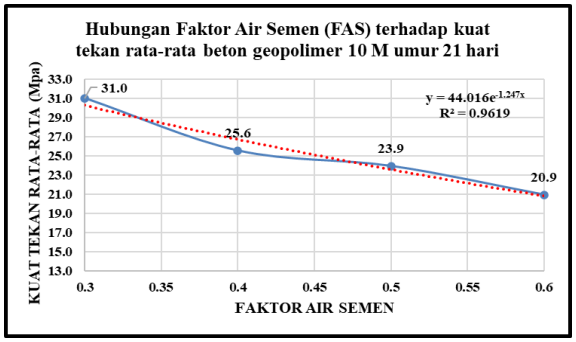
(Sumber : Hasil Penlitian)

Tabel 1.5 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer pada setiap variasi Faktor Air Semen (FAS) dan umur pengujian. Secara umum, kuat tekan meningkat seiring bertambahnya umur beton dan cenderung menurun dengan meningkatnya nilai FAS.



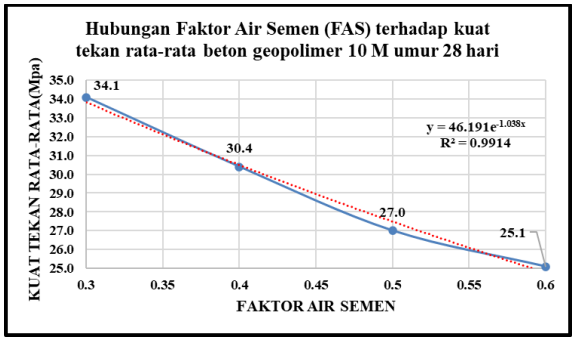
(Sumber : Hasil Penlitian)

Gambar 1. 5 Grafik Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 14 Hari



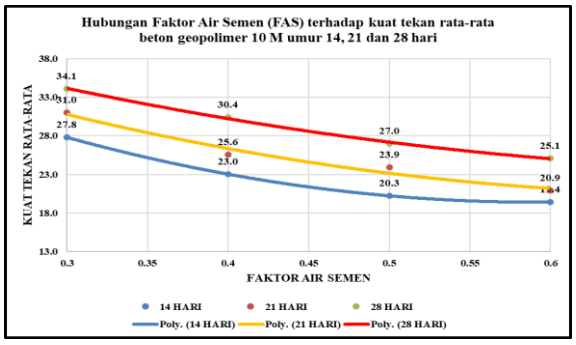
(Sumber : Hasil Penlitian)

Gambar 1. 6 Grafik Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 21 Hari



(Sumber : Hasil Penlitian)

Gambar 1. 7 Grafik Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 28 Hari



(Sumber : Hasil Penlitian)

Gambar 1. 8 Grafik Kuat Tekan Beton Geopolimer Umur 14,21 dan 28 Hari

Interval Kepercayaan

Menggunakan persamaan :

$$\bar{x} - t_{(n-1;\frac{a}{2})} \times \frac{S}{\sqrt{n}} < \mu < \bar{x} - t_{(n-1;\frac{a}{2})} \times \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Dimanana :

$\bar{x}$: Nilai rata-rata
s : Standar deviasi
t(2;0.025) : Nilai t yang didapat dari tabel distribusi t
n : Banyaknya data
dk : Derajat kebebasan

Maka nilai interval adalah sebagai berikut:
19,700213 <μ<35,92611397

Analisa Regresi

Model awal rumus eksponensial adalah :

$$\mathbf{y : a \,.\, b^x}$$

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

$$\mathbf{In\ \ y = lna + bx}$$

Dimana:
In y kita sebut Y
In a kita sebut a (interscp)
b adalah koefisien kemiringan (slope)
Sehingga bentuknya :

$$\mathbf{Y = a + bx}$$

Dimana :
b : koefisien kemiringan
a : nilai konstanta (nilai y saat x = 0)
e : bilangan euler
n : jumlah data
Σ (x'y) : jumlah hasil kali x dan in *y* per baris data
Σx : jumlah semua nilai x
ΣY : jumlah semua nilai in *y*
Σx^2 : jumlah kuadarat x
Mengidentifikasi koefisien R^2

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

Rata-rata nilai $\bar{yI} = \frac{90.48832}{4} = 22.622081$
SST : $\Sigma\,(yi + yi)^2$
: 43,05
SSE : 2,746671
R^2 : $\sqrt{2,746671}$
R : 0,936201
Dimana :
Yi : Nilai rata- rata yi
Yi : Nilai yi estimasi
R : Koefisien Korelasi
R^2 : Koefisien determinasi
SST : Total Variansi
SSE : Jumlah Kuadrat Error

Tabel 1. 6 Data perhitungan y estimasi yi

NO	x	y_i	yi (Estimasi) $46.19079.e^{(-1.0381x)}$		$(y_i - y_1)^2$	
1	0.3	34.10	32.2370263		3.4620	
2	0.4	30.40	29.05835088		1.8091	
3	0.5	27.01	26.19310317		0.6614	
4	0.6	25.10	23.61037819		2.2057	
Total	1.8	116.603	111.0988585		8.1382	
a	b	y	SST	SSE	R^2	R
3.83278	-1.0381	46.1908	217.58	0.41273	√0.9981	0.9981

(Sumber : Hasil Analisis)

4. SARAN DAN KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisi penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan mengenai

pengaruh Faktor Air Semen (W/C) sebesar 0.3 – 0.6 pada beton geopolimer berbasis fly ash terhadap kuat tekan. Kesimpulan yang diperoleh selarasa dengan rumusan masalah adalah sebagai berikut :

1. Variasi Faktor Air Semen (FAS) berpengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash tipe C. Hasil penelitian menunjukan bahwa peningkatan nilai FAS dari 0.3 hingga 0.6 menyebabkan kuat tekan beton mengalami penurunan pada seluruh umur pengujian, yaitu 14, 21 dan 28 hari. Kuat tekan tertinggi diperoleh pada FAS 0.3 sedangkan kuat tekan terendah diperoleh pada FAS 0.6. Dengan demikian semakin tinggi nilai FAS yang digunakan, maka kuat tekan yang dihasilkan cenderung semakin menurun.
2. Faktor umur berpengaruh terhadap kuat tekan beton geopolimer berbasis fly ash tipe C. Kuat tekan beton meningkat pada seluruh variasi FAS seiring bertambahnya umur pengujian 14,21 dan 28 hari. Sebaliknya, peningkatan nilai FAS cenderung menurunkan kuat tekan beton. Hubungan antara FAS dan kuat tekan pada setiap umur pengujian juga mengikuti model regresi eksponensial dengan nilai koefisien determinasi yang tinggi, sehingga menunjukan bahwa model tersebut mampu menggambarkan hubungan antara kedua variabel dengan sangat baik

5. DAFTAR PUSTAKA

Alterary, S. S., & Marei, N. H. (2021). Fly ash properties, characterization, and applications: A review. Journal of King Saud University - Science, 33(6), 101536. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101536

Anonim. (n.d.-a). SNI 1974-2011 (Cara Uji Kuat Tekan Beton Dengan Benda Uji Silinder).

Anonim. (n.d.-b). *SNI 2493-2011 (Penggunaan Abu Terbang Dalam Campuran Beton Sedikit Semen Portland)*.

Anonim. (2002a). *SNI 03-2461-2002 (Spesifikasi Agregat Ringan Untuk Beton Ringan Struktural)*.

Anonim. (2002b). *SNI 03-2834-2000 (Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal)*.

Awad, S. U. (2025). Studi Penelitian Faktor Air Cementitious (W/C) Pada Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash terhadap Kuat Tekan (Aktivator: Kalium Hidroksida + Natrium Silikat). http://eprints.itn.ac.id/14990/

Chuewangkam, N., Kidkhunthod, P., & Pinitsoontorn, S. (2024). Direct evidence for the mechanism of early-stage geopolymerization process. Case Studies in Construction Materials, 21(July), e03539. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03539

Das, M., Manik, S. K., Dutta, D., & Biswas, T. G. (n.d.). Study ofgeopolymerpaste Resulting From Alkali Activated Class F Black Fly ash Withthedifferent Combination Approach Ofkoh. 53–57.

El Alouani, M., Saufi, H., Aouan, B., Bassam, R., Alehyen, S., Rachdi, Y., El Hadki, H., El Hadki, A., Mabrouki, J., Belaaouad, S., Ez-Zaki, H., & Barka, N. (2024). A comprehensive review of synthesis, characterization, and applications of aluminosilicate materials-based geopolymers. Environmental Advances, 16(January), 100524. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100524

Ilyas, Y. A., Yanti, G., & Putri, L. D. (2022). Studi Beton Geopolimer Dengan Bahan Dasar Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Beton. Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS), 5(2), 83–92. https://doi.org/10.54367/jrkms.v5i2.2096

Julharitmo, Ahmad, F., & Drastinawati. (2015). Pemanfaatan Limbah Abu Terbang (Fly Ash) Batu Bara Sebagai Bahan Campuran Beton Geopolimer. In Jom Fteknik (Vol. 2, pp. 1–7).

Kementrian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat. (2019). Pedoman Konstruksi Bangunan dan Rekayasa Sipil Penggunaan Abu Terbang Dalam Campuran Beton Sedikit Semen Portland. *Dinas Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat*, *September*.

Khan, R., Iqbal, S., Soliyeva, M., Ali, A., & Elboughdiri, N. (2025). Advanced clay-based geopolymer: influence of structural and material parameters on its performance and applications. *RSC Advances*, *15*(16), 12443–12471. https://doi.org/10.1039/d4ra07601j

Sulistyorini, D., Galuh, D. L. C., Prayogi, Y. O., Ardiansyah, M. T., & Hakim, A. R. (2024).

Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 Dan 2,5. *Bangun Rekaprima*, *9*(1), 106–114. https://doi.org/10.32497/bangunrekaprima.v9i1.4603

Rambu Day Ndapanggau, I. K. (2025). *Studi Penelitian Pengaruh Faktor Air Cementitious (W/C) Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash (Aktivator : Kalium Hidroksida + Natrium Silikat)*. http://eprints.itn.ac.id/15000/