PILAR JURNAL TEKNIK SIPIL
Vol.20 No. 02, September 2025
Diterbitkan oleh:
Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Sriwijaya
ISSN (Print) : 1907 - 6975; ISSN (Online) : 2722 - 2926
https://jurnal.polsri.ac.id/index.php/pilar/index

KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER MENGGUNAKAN FLY ASH SEBAGAI PENGGANTI SEMEN DENGAN BAHAN TAMBAH NaOH DAN Na_2SiO_3

Novita Sari[1]*, Nurilna Jannah[1], Lina Flaviana Tilik[2], Nurul Aina Syahira[2]

[1]Program Studi Perancangan Jalan dan Jembatan, Politeknik Negeri Sriwijaya
[2]Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Sriwijaya

[*]Email Korespondensi : novvsarii589@gmail.com

Naskah diterima : 10 September 2025. Disetujui: 15 September 2025. Diterbitkan : 30 September 2025

ABSTRACT

Geopolymer concrete is an environmentally friendly alternative because it does not use cement, thus reducing carbon emissions and utilizing industrial waste. In this study, three variations of geopolymer concrete mixtures were prepared with activator solution to fly ash ratios: BG 3:1, BG 4:1, and BG 5:1, as well as one variation of normal concrete as a comparison. Compressive strength tests were conducted at 7, 14, and 28 days, using a curing method using a plastic cover to maintain moisture during the hardening process. The test results showed that the higher the activator solution ratio, the higher the resulting compressive strength. The 5:1 BG variation yielded the best results of 414.8 kg/cm² at 28 days, exceeding that of conventional concrete, which only reached 255.6 kg/cm². Meanwhile, the 3:1 BG variation yielded the lowest results and did not meet the K-225 concrete quality target. This study concludes that geopolymer concrete has the potential to be used as an alternative to conventional concrete, provided the material composition and activator solution ratio are properly adjusted. The use of fly ash also offers a solution for recycling industrial waste.

***Keywords** : Geopolymer concrete, Fly ash, NaOH, Na_2SiO_3, Compressive Strength, K-225 quality*

ABSTRAK

Beton geopolimer merupakan salah satu alternatif ramah lingkungan karena tidak menggunakan semen, sehingga dapat mengurangi emisi karbon dan memanfaatkan limbah industri. Dalam penelitian ini, dibuat tiga variasi campuran beton geopolimer dengan rasio larutan aktivator terhadap fly ash yaitu BG 3:1, BG 4:1, dan BG 5:1, serta satu variasi beton normal sebagai pembanding. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari, dengan metode curing menggunakan penutupan plastik untuk menjaga kelembaban selama proses pengerasan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin besar rasio larutan aktivator, semakin tinggi kuat tekan yang dihasilkan. Variasi BG 5:1 memberikan hasil terbaik sebesar 414,8 kg/cm² pada umur 28 hari, melebihi beton normal yang hanya mencapai 255,6 kg/cm². Sementara itu, variasi BG 3:1 menunjukkan hasil terendah dan belum memenuhi target mutu beton K-225. Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa beton geopolimer berpotensi digunakan sebagai alternatif pengganti beton normal, asalkan komposisi bahan dan rasio larutan aktivator diatur dengan tepat. Penggunaan fly ash juga menjadi solusi untuk mendaur ulang limbah industri.

Kata kunci : Beton Geopolimer, Fly Ash, NaOH, Na2SiO3, Kuat Tekan, Mutu K- 225.

1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Meningkatnya kebutuhan infrastruktur di Indonesia mendorong peningkatan penggunaan beton sebagai material konstruksi utama. Perkembangan teknologi konstruksi terus mendorong diciptakannya material bangunan yang ramah lingkungan, ekonomis,dan memiliki performa yang tinggi. Salah satu material yang menjanjikan adalah beton geopolimer yang merupakan material komposit yang dibuat dari bahan sisa industri dan memiliki keunggulan dalam kekuatan, ketahanan terhadap api dan korosi serta emisi karbon yang rendah.

Menurut Davidovits, Beton geopolimer adalah material inovatif yang dibuat tanpa menggunakan semen portland melainkan melalui reaksi antara material kaya silika dan alumina seperti fly ash dengan larutan aktivator alkali seperti natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na2SiO3) [1]. Beton geopolimer juga dikenal sebagai material yang lebih ramah lingkungan karena tidak memerlukan semen dalam pembuatannya, sehingga emisi karbon dari proses produksi semen portland dapat dikurangi.

Fly ash sering digunakan dalam pembuatan beton geopolimer yang merupakan produk sampingan dari pembakaran batubara di pembangkit listrik tenaga uap. Menurut American Coal Ash Association (ACAA), sekitar 70 juta ton fly ash dihasilkan setiap tahunnya di Amerika Serikat saja. Fly ash terdiri dari partikel halus yang dapat terbang ke udara selama proses pembakaran, dan memiliki sifat fisik dan kimia yang membuatnya cocok digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Karakteristik utama fly ash meliputi ukuran partikel yang kecil, reaktivitas yang tinggi, dan kandungan mineral yang bervariasi, tergantung pada jenis batubara yang dibakar [2].

Fly ash diklasifikasikan ke dalam tiga jenis, yaitu tipe N, tipe F, dan tipe C. *Fly ash* tipe N atau natural adalah abu terbang yang berasal dari sumber alami seperti aktivitas vulkanik dan umumnya mengandung mineral amorf yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan pengikat dalam campuran geopolimer. Sementara itu, *fly ash* tipe F merupakan abu terbang dengan kadar kalsium rendah yang berasal dari pembakaran batu bara jenis bituminous atau anthracite; tipe ini kaya akan kandungan silika dan alumina sehingga sangat cocok digunakan sebagai bahan utama dalam beton geopolimer. Berbeda dengan itu, *fly ash* tipe C memiliki kadar kalsium yang tinggi karena dihasilkan dari pembakaran batu bara lignite atau sub- bituminous, dan memiliki sifat semen sehingga mampu mengeras hanya dengan penambahan air tanpa perlu bahan pengikat tambahan.

1.2. Tinjauan Pustaka

Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Mochamad Solikin menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* tipe F dan slag pada nilai perbandingan 1:1 dalam beton geopolimer mampu menghasilkan kuat tekan tinggi, di mana nilai maksimum tercapai dengan molaritas NaOH 16M sebesar 65,17 MPa, sedangkan nilai paling rendah terjadi pada molaritas 8M sebesar 51,7 MPa. Proses *curing* juga memainkan peran penting dalam peningkatan kuat tekan, di mana *curing* dengan oven selama 24 jam terbukti lebih efektif dibandingkan curing di udara terbuka[3].

Penelitian oleh Rachmawati et al tahun 2019 menunjukkan bahwa beton geopolimer yang menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen mampu mencapai kekuatan tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton konvensional. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendorong industri konstruksi di Indonesia untuk mengadopsi teknologi beton geopolimer sebagai solusi berkelanjutan dalam pembangunan infrastruktur.

Kekuatan tekan adalah salah satu parameter utama yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas beton. Kekuatan tekan beton geopolimer dipengaruhi oleh berbagai faktor termasuk jenis dan proporsi *fly ash*, rasio air terhadap bahan, serta kondisi *curing*.

Penggunaan semen konvensional dalam produksi beton menghadapi berbagai masalah, termasuk tingginya emisi karbon selama proses produksinya dan kebutuhan akan sumber daya alam yang tidak terbarukan. Selain itu, beton yang dihasilkan sering kali memiliki sifat yang kurang optimal, seperti retak dan penurunan kekuatan seiring waktu. Menurut penelitian

Pacheco-Torgal et al penggunaan bahan alternatif seperti *fly ash* dalam beton geopolimer dapat mengatasi beberapa masalah ini dengan memberikan sifat yang lebih baik dan berkelanjutan [4].

Salah satu tantangan dalam pengembangan beton geopolimer adalah pencarian alternatif pengganti semen portland yang merupakan material yang bersifat insentif energi dan menghasilkan emisi karbon yang tinggi. *Fly ash*, sisa buangan dari pembakaran batu bara, muncul sebagai salah satu alternatif yang dapat digunakan. *Fly ash* memiliki sifat *pozzolanik* yang berpotensi meningkatkan kekuatan beton geopolimer dan mengurangi penggunaan semen portland.

Meskipun beberapa penelitian telah menunjukkan potensi *fly ash* sebagai pengganti semen pada beton geopolimer, peneitian lebih lanjut masih diperlukan untuk menentukan pengaruh *fly ash* terhadap sifat mekanis beton geopolimer terutama kuat tekan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis "efisiensi penggunaan *natrium hidroksida* (NaOH) dan *natrium silikat* (Na_2SiO_3) pada beton geopolimer dengan *fly ash* sebagai pengganti semen" sehingga penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan formula beton geopolimer yang lebih efisien dan berkelanjutan. Penelitian ini juga diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap pemahaman tentang penggunaan *fly ash* serta *natrium hidroksida* (NaOH) dan *natrium silikat* (Na_2SiO_3) dalam beton geopolimer. Dengan hasil yang diperoleh, diharapkan dapat disimpulkan bahwa penggunaan *fly ash* tidak hanya bermanfaat dalam meningkatkan kuat tekan beton, tetapi juga dalam mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi.

2. METODE PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian dilaksanakan di Laboratorium Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang yang berada di Jalan Srijaya Negara, Bukit Lama, Kecamatan Ilir Barat 1. Penelitian dilakukan selama 12 minggu. Kegiata penelitian diawali dari pengujian bahan, pembuatan benda uji dengan campuran *fly ash* dan larutan alkali (NaOH & Na_2SiO_3), pengujian kuat tekan beton. Adapun alat-alat yang digunakan dalam setiap item pada pekerjaan ini adalah sebagai berikut: Timbangan, *Density Spoon,* Meteran, Cawan, Oven, Satu set saringan, Mesin penggetar ayakan, Gelas Ukur, Set pengujian SSD, Penumbuk besi, Alat vicat, Tabung le chatalier, Spatula, Piknometer, Mesin uji kuat tekan, Kuas, Majun. Adapun bahan-bahan yang digunakan untuk membuat beton sebagai berikut: Semen Portland tipe I Tiga Roda, Agregat halus, Agregat kasar, Air, *Fly ash*, Bahan Kimia (Na2SiO3 & NaOH).

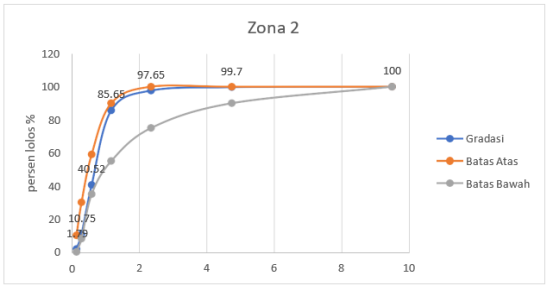
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisa Saringan Agregat

Tabel 1 menunjukan jumlah persentase kumulatif dari butir agregat yang tertahan sebesar 260,72 gram dengan nilai MHB sebesar 2,61. Nilai tersebut memenuhi syarat untuk bahan beton sesuai dengan SNI ASTM C136-2012 dimana nilai modulus halus butir antara 1,50 - 3,80 dengan variasi butir sesuai standar gradasi [5]. Persentase berat lolos hasil pengujian serta batas minimum dan maksimum gradasi agregat halus dapat dilihat pada gambar 1;

Tabel 1. Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Halus

No Saringan	Berat Tertahan		% Kumulatif	
	Gram	(%)	Tertahan	Lolos
38,1	-	-	-	100
19	-	-	-	100
9,5	0	0	0	100
4,75	3	0,3	0,3	99,7
2,36	20,5	2,05	2,35	97,65
1,18	71,8	7,18	9,53	90,47
0,6 (No.30)	506,5	50,65	60,18	39,82
0,3 (No. 50)	298,7	29,87	90,05	9,95
0,15 (No.100)	82,6	8,26	98,31	1,69
0,075 (No. 200)	12,9	1,29	99,6	0,4
Pan	4	0,4	100	0
Total	1000	100	260,72	-



Gambar 1. Gradasi Agregat Halus Zona II

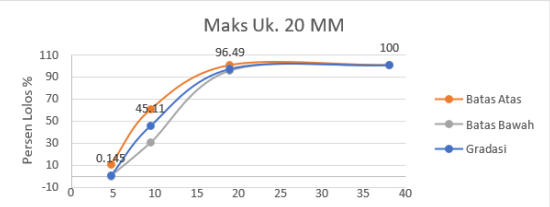
Dari gambar 1 dapat disimpulkan bahwa agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam kategori zona II sesuai dengan batas gradasi standar. Hal ini

ditunjukkan oleh kurva gradasi yang berada di antara batas atas dan batas bawah, yang menggambarkan distribusi butiran pasir dengan ukuran menengah. Dengan demikian, agregat halus ini memiliki karakteristik gradasi yang sesuai untuk digunakan dalam campuran beton, karena dapat memberikan kemudahan pengerjaan *(workability),* kepadatan campuran yang baik, serta memperbaiki ikatan antara agregat dan pasta pengikat, baik pada beton semen maupun beton geopolimer.

Tabel 2. Hasil Pengujian Analisa Saringan Agregat Kasar

No Saringan	Berat Tertahan (gram)	(%)	% Kumulatif Tertahan	Lolos
38,1	0	0	0	100
19	70,2	3,51	3,51	96,49
9,5	1027,6	51,38	54,89	45,11
4,75	899,3	44,965	99,855	0,145
2,36	0,8	0,04	99,895	0,105
1,18	0,1	0,005	99,9	0,1
0,6	-	-	100	0
0,3	-	-	100	0
0,15	-	-	100	0
Pan	2	0,1	100	0
Total	2000	100	658,05	-

Pada tabel 2 jumlah persen kumulatif dari butir agregat yang tertahan sebesar 658,05 gram dengan nilai MHB sebesar 6,58. Nilai ini memenuhi spesifikasi nilai maksimal yang telah ditetapkan SNI ASTM C135-2012 sebesar 8 [5]. Grafik persentase berat lolos hasil pengujian serta batas minimum dan maksimum gradasi agregat kasar dapat dilihat pada gambar 2;



Gambar 2. Gradasi Split Max 20mm

Pada gambar 2 dapat disimpulkan bahwa agregat kasar dengan ukuran maksimum 20 mm yang digunakan dalam penelitian ini memiliki gradasi yang berada di antara batas atas dan batas bawah, sesuai dengan spesifikasi standar. Hal ini menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan memiliki distribusi ukuran butir yang baik. Dengan karakteristik ini, agregat tersebut layak digunakan dalam campuran beton karena mampu memberikan kekuatan dan kepadatan yang optimal serta mendukung campuran beton.

3.2. Berat Jenis dan Penyerapan Agregat

Hasil perhitungan berat jenis dan penyerapan agregat halus menunjukkan nilai berat jenis SSD sebesar 2,51. Hasil perhitungan tersebut telah memenuhi spesifikasi nilai minimum nilai SSD yang telah ditetapkan menurut SNI 1970-2016 adalah 2,5 [6]. Lebih lanjut, nilai penyerapan agregat halus sebesar 2,1 dan memenuhi spesifikasi nilai maksimum yang telah ditetapkan menurut SNI 1970-2016 adalah 3%. Maka agregat halus yang dipakai pada penelitian ini memenuhi syarat berat jenis dan penyerapan untuk dijadikan bahan dalam perencanaan beton.

Tabel 3. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Halus

Pemeriksaan	Kode
Berat piknometer + benda uji + air	B1
Berat benda uji kering oven	B2
Berat piknometer + air	B3
Berat pasir	

Berat Jenis Kering $= \frac{B2}{B3+500;B1}$

$= \frac{498}{1263,6+500;1564,1}$

$= 2,50$

Berat Jenis SSD $= \frac{500}{B3+500<B1}$

$= \frac{500}{1263,6+500;1564,1}$

$= 2,51$

Penyerapan $= \frac{500;B2}{B2} \; x \; 100\%$

$= \frac{500;498,9}{498,9} \; x \; 100\%$

$= 2,1\ \%$

Berdasarkan hasil perhitungan berat jenis dan penyerapan agregat kasar didapat nilai berat jenis kering sebesar 2,33 dan berat jenis SSD sebesar 2,39 dimana nilai ini telah memenuhi spesifikasi nilai minimum menurut SNI 1969-2016 sebesar 2,5 [7]. Nilai penyerapan agregat kasar diperoleh sebesar 2,51% dan nilai ini memenuhi spesifikasi nilai maksimum yang telah ditetapkan menurut SNI 03- 1970-2008 adalah 3%. Maka agregat kadar yang dipakai pada penelitian ini memenuhi syarat berat jenis dan penyerapan untuk dijadikan bahan campur dalam penelitian beton.

Tabel 4. Hasil Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Agregat Kasar

Pemeriksaan	Kode	Berat (Gram)
Berat Benda Uji Kering Oven	BK	497
Berat Benda Kering Uji Permukaan	BJ	509,5
Berat Piknometer + Benda Uji + Air	W1	1507,9
Berat Piknometer + Air	W2	1211,3

$$\text{Berat Jenis Kering} = \frac{Bk}{W2+BJ;W1} = \frac{497}{1211,3+509,5;1507,9} = 2,33$$

$$\text{Berat Jenis SSD} = \frac{BJ}{W2+BJ;W1} = \frac{509,5}{1211,3+509,5;1507,9} = 2,39$$

$$\text{Penyerapan} = \frac{BJ;BK}{BK}\ x\ 100\% = \frac{509,5;497}{497}\ \text{x}\ 100\% = 2,51\ \%$$

3.3. Kadar Air dan Kadar Lumpur Agregat

Dari hasil pengujian agregat halus diperoleh nilai kadar air sebesar 3,0 % dan memenuhi spesifikasi telah ditetapkan menurut SNI 1971-2011 yaitu dengan interval untuk kadar air antara 2,0 % - 5,0 % [8]. Nilai kadar lumpur agregat halus sebesar 3,9 % dan memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan menurut SNI 03-4142-1996 yaitu maksimal 5% [9]. Sehingga bahan tersebut sesuai persyaratan sebagai bahan campuran beton.

Tabel 5. Hasi Pengujian Kadar Air dan Kadar Lumpur Agregat Halus

No	Keterangan	Nilai Agregat Halus
1	Berat Benda Uji (W1)	1000 gr
2	Berat Kering Oven Sebelum Di Cuci (W2)	970,8
3	Berat Kering Oven Sesudah Dicuci (W3)	932,2 gr

$$\text{Kadar Air} = \frac{W1;W2}{W2}\ x\ 100\% = \frac{1000;970,8}{970,8} x100\% = 3,0\ \%$$

$$\text{Kadar Lumpur} = \frac{W2;W3}{W2}\ x100\% = \frac{970,8;932,2}{970,8}\ x\ 100\% = 3,9\ \%$$

Pada pengujian kadar air agregat kasar, diperoleh nilai sebesar 2,0 % dan memenuhi spesifikasi telah ditetapkan menurut SNI 1971-2011 yaitu dengan interval untuk kadar air antara 0,5 % - 2,0 % [8]. Nilai kadar lumpur agregat kasar yang didapatkan adalah sebesar 0,83 % dan memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan menurut SNI 4142-1996 yaitu maksimal 1% [9]. Sehingga agregat kasar tersebut dapat digunakan sebagai bahan campuran beton.

Tabel 6. Hasi Pengujian Kadar Air dan Kadar Lumpur Agregat Kasar

No	Keterangan	Nilai Agregat Kasar
1	Berat Benda Uji Sebelum dioven (W1)	2000 gr
2	Berat Kering Oven Sebelum DiCuci (W2)	1960,4 gr
3	Berat Kering Oven Sesudah Dicuci (W3)	1944,2 gr

3.4. Bobot Isi Agregat

Dari hasil pengujian diperoleh data rata-rata bobot isi gembur dan bobot isi padat agregat halus masing-masing 1,52 gr/cm3 dan 1,55 gr/cm3. Nilai ini memenuhi standar SNI 03-4804-1998 yaitu batas minimum nilai berat isi untuk agregat halus 0,4 – 1,9[10].

Tabel 7. Hasi Pengujian Bobot Isi Gembur Agregat Halus

No	Keterangan	Pengujian		
		I	II	III
1.	Berat silinder kosong (A)	2039,6	2039,6	2039,6
2.	Berat silinder + agregat halus (B)	6533,1	6540,7	6540,4
3.	Berat agregat halus gembur (C) = B - A	4493,5	4501,1	4500,8
4.	Volume = $\pi r^2 t$ (π = 3,14 r = 7,55 cm ; t = 16,5 cm)	2953,300	2953,300	2953,300
5.	Bobot isi gembur = $\frac{c}{v}$	1,52 gr/cm^3	1,52 gr/cm^3	1,52 gr/cm^3
6.	Bobot isi gembur rata-rata	1,52 gr/cm^3		

Tabel 8. Hasi Pengujian Bobot Isi Padat Agregat Halus

No	Keterangan	Pengujian		
		I	II	III
1.	Berat silinder kosong (A)	2039,6	2039,6	2039,6
2.	Berat silinder + agregat halus (B)	6538,9	6687,1	6638,8
3.	Berat agregat halus gembur (C) = B - A	4499,3	4647,5	4599,2
4.	Volume = $\pi r^2 t$ (π = 3,14 r = 7,55 cm ; t = 16,5 cm)	2953,300	2953,300	2953,300
5.	Bobot isi padat = $\frac{c}{v}$	1,52 gr/cm^3	1,57 gr/cm^3	1,56 gr/cm^3
6.	Bobot isi padat rata-rata	1,55 gr/cm^3		

Pada pengujian agregat kasar, diperoleh data rata-rata bobot isi gembur dan bobot isi padat agregat kasar masing-masing 1,27 gr/cm3 dan 1,36 gr/cm3. Dari pengujian bobot isi gembur dan bobot isi padat agregat kasar memenuhi standar SNI 03-4084-1998 yaitu batas minimum nilai berat isi untuk agregat kasar 0,4 – 1,9 [10].

Tabel 9. Hasi Pengujian Bobot Isi Gembur Agregat Kasar

No	Keterangan	Pengujian		
		I	II	III
1.	Berat silinder kosong (A)	2089,7	2089,7	2089,7
2.	Berat silinder + agregat kasar (B)	9117,1	8949,6	8792,3
3.	Berat agregat kasar gembur (C) = B - A	7027,4	6859,9	6702,6
4.	Volume = $\pi r^2 t$ (π = 3,14 r = 9,5 cm ; t = 19 cm)	5384,315	5384,315	5384,315
5.	Bobot isi gembur = $\frac{c}{v}$	1,30 gr/cm^3	1,27 gr/cm^3	1,24 gr/cm^3
6.	Bobot isi gembur rata-rata		1,27 gr/cm^3	

Tabel 10. Hasi Pengujian Bobot Isi Padat Agregat Kasar

No	Keterangan	Pengujian		
		I	II	III
1.	Berat silinder kosong (A)	2089,7	2089,7	2089,7
2.	Berat silinder + agregat kasar (B)	9454,0	9331,9	9509,9
3.	Berat agregat kasar gembur (C) = B - A	7364,3	7242,2	7420,2
4.	Volume = $\pi r^2 t$ (π = 3,14 r = 9,5 cm ; t = 19 cm)	5384,315	5384,315	5384,315
5.	Bobot isi Padat = $\frac{c}{v}$	1,37 gr/cm^3	1,34 gr/cm^3	1,38 gr/cm^3
6.	Bobot isi padat rata-rata		1,36 gr/cm^3	

3.5. Pengujian Berat Jenis Semen Portland

Berdasarkan data dari tabel 11, berat jenis semen portland mendapat nilai sebesar 2,95 dimana nilai ini telah memenuhi syarat SNI 2049-2015 yaitu beratjenis semen portland antara 3-3,2 [11].

Tabel 11. Hasil Pengujian Berat Jenis Semen Portland

No	Keterangan	Nilai
1	Berat semen	64 gram
2	Berat Jenis Air	1
3	V1	0,80
4	V2	22,5
	Perhitungan Berat Jenis = $\frac{berat\ semen}{(v1;v2)}$	2,95

3.6. Pengujian Konsistensi Semen

Dari hasil pengujian di Laboratorium di dapatkan hasil konsistensi semen seperti berikut ini :

$$\text{Konsistensi} = \frac{Berat\ Air}{Berat\ Semen}\ x\ 100\%$$

$$= \frac{125}{500}\ x\ 100\%$$

$$= 25\%$$

Dari berdasarkan hasil pengujian diatas dapat disimpulkan dari nilai konsistensi semen sebesar 25% dari berat semen.

3.7. Pengujian Waktu Ikat Semen

Dapat disimpulkan bahwa : Waktu ikat awal semen (penurunan 25 mm Pada grafik diatas dilihat data diantara 75 menit (34 mm) dan 90 menit 17 (mm).

$$\text{Interpolasi} = \frac{(90;x)}{(90;75)} = \frac{(34;25)}{(34;17)}$$

$$= \frac{(90;x)}{15} = \frac{9}{17}$$

$$1530\text{-}17x = 135$$

$$-17x = 135 - 1530$$

$$-17x = -1395$$

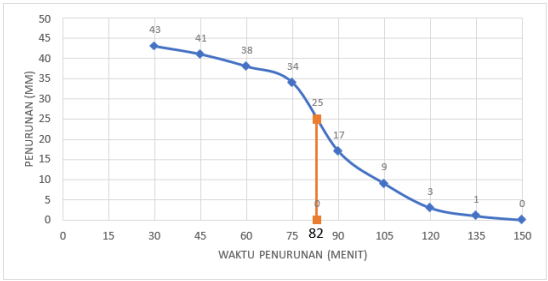
$$X = \frac{<;1395}{;17}$$

$$X = 82{,}06 \text{ menit}$$

Dari hasil data pengujian waktu pengikatan semen portland di Laboratorium diperoleh waktu ikat awal semen portland pada penurunan 25 mm di dapat menit ke-82 dan waktu ikat akhir semen portland di dapat nilai penurunan di 0 mm terjadi pada menit ke-150.

Tabel 12. Hasil pengujian Waktu Ikat Semen

No. Pengamatan	Waktu Penurunan (Menit)	Penurunan (mm)
1	30	43
2	45	41
3	60	38
4	75	34
5	90	17
6	105	9
7	120	2
8	135	1
9	150	0



Gambar 3. Data Hasil Pengujian Waktu Ikat Semen

3.8. Perbandingan Campuran beton

Tabel 13. Komposisi Material Beton Normal dan Beton Geopolimen Per Benda Uji

Jenis Beton	Campuran (Na2SiO3/ NaOH)	Bahan Material Beton Normal dan Beton Geopolimer (gram)						
		Semen	Fly Ash	Na2SiO3	NaOH	Aquades	Pasir	Split
Beton Normal	0	1540	-	-	-	-	2700	3727
Beton Geopolimer	3 :1	-	1540	510	170	170	2700	3727
	4 : 1	-	1540	566,7	141,7	141,7	2700	3727
	5 : 1	-	1540	607,2	121,4	121,4	2700	3727

Dari tabel 13 dapat dilihat larutan alkali (Na2SiO3/NaOH) menjadi pengganti air dalam beton geopolimer. Perbandingan larutan alkali dalam penelitian ini menggunakan satu variasi larutan NaOH dengan Molaritas 8 M dan berbagai variasi (3,4,5) Na2SiO3. Untuk menghitung larutan NaOH 8M menggunakan persamaan.

$$\text{Molaritas} = \frac{gr}{Mr\ NaOH}\ x\ \frac{1000}{mL}$$

Keterangan : Mr = molekul relatif, berat atom

mL = mililiter

Dimana, Mr NaOH = 40

Berat larutan NaOH dihitung dengan persamaan :

1. $\frac{Na2SiO3}{NaOH+Aquades} = \frac{3}{1}$

$$3Na2SiO3 - NaOH - Aquades = 0$$
$$Na2SiO3 + NaOH + Aquades = 850$$
$$-5NaOH, Aquades = -850$$
$$NaOH, Aquades = 170$$

2. $\frac{Na2SiO3}{NaOH+Aquades} = \frac{4}{1}$

$$4Na2SiO3 - NaOH - Aquades = 0$$
$$Na2SiO3 + NaOH + Aquades = 850$$
$$-6NaOH, Aquades = -850$$
$$NaOH, Aquades = 141,6$$

3. $\frac{Na2SiO3}{NaOH+Aquades} = \frac{4}{1}$

$$5Na2SiO3 - NaOH - Aquades = 0$$
$$Na2SiO3 + NaOH + Aquades = 850$$
$$-7NaOH, Aquades = -850$$
$$NaOH, Aquades = 121,4$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan larutan NaOH dengan 3 perbandingan menggunakan persamaan :

Perbandingan I (3:1)

$$M = \frac{gr}{Mr\ NaOH}\ x\ \frac{1000}{V}$$
$$8 = \frac{170}{40}\ x\ \frac{1000}{V}$$
$$8 = \frac{170000}{40V}$$
$$320V = 170000$$
$$V = 531{,}25\ mL$$
$$= 0{,}53\ L$$

Perbandingan II (4:1)

$$M = \frac{gr}{Mr\ NaOH}\ x\ \frac{1000}{V}$$
$$8 = \frac{141{,}6}{40}\ x\ \frac{1000}{V}$$
$$8 = \frac{141700}{40V}$$
$$320V = 141700$$
$$V = 442{,}81\ mL$$
$$= 0{,}43\ L$$

Perbandingan III (5:1)

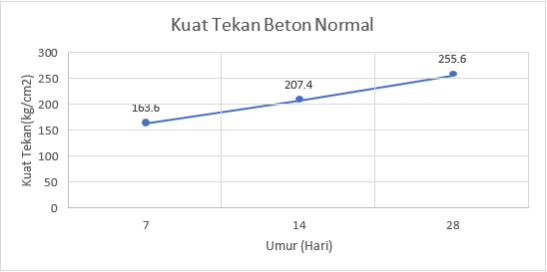
$$M = \frac{gr}{Mr\ NaOH}\ x\ \frac{1000}{V}$$
$$8 = \frac{121{,}4}{40}\ x\ \frac{1000}{V}$$
$$8 = \frac{121400}{40V}$$
$$320V = 121400$$
$$= 379{,}37\ mL$$
$$= 0{,}38\ L$$

3.9. Pengujian Kuat Tekan

Tabel 14. Hasil Pengujian Kuat Tekan

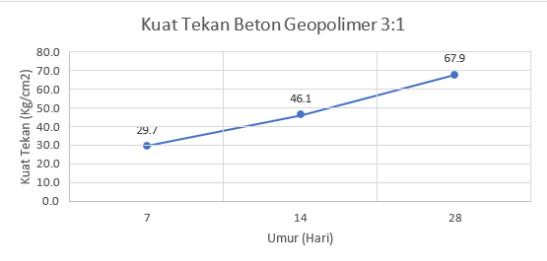
Variasi	No Sampel	umur 7 hari: Kuat tekan (kg/cm2)	umur 7 hari: Rata-Rata (kg/cm2)	umur 14 hari: Kuat tekan (kg/cm2)	umur 14 hari: Rata-Rata (kg/cm2)	umur 28 hari: Kuat tekan (kg/cm2)	umur 28 hari: Rata-Rata (kg/cm2)
BN	1	155,3	163,6	206,6	207,4	253,3	255,6
	2	166,6		184,4		246,7	
	3	168,9		231,1		266,7	
BG 3:1	1	25,3	29,7	40,4	46,1	57,8	67,9
	2	29,7		42,7		69,8	
	3	34,2		55,1		76,0	
BG 4:1	1	122,2	113,3	160,0	147,0	200,0	191,9
	2	106,6		134,2		176,4	
	3	111,2		146,7		199,1	
BG 5:1	1	129,8	146,7	251,1	245,9	408,4	414,8
	2	134,2		284,4		396,9	
	3	176		202,2		439,1	

Kurva dari kuat tekan beton normal dan beton geopolimer dapat dilihat dibawah ini:



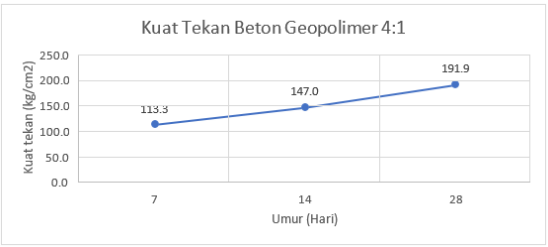
Gambar 4. Grafik Pengujian Beton Normal

Gambar 4 menunjukkan nilai kuat tekan beton normal (BN) mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton. Pada umur 7 hari, rata-rata kuat tekan sebesar 163,6 kg/cm², kemudian meningkat menjadi 207,4 kg/cm² pada umur 14 hari, dan mencapai 255,6 kg/cm² pada umur 28 hari.



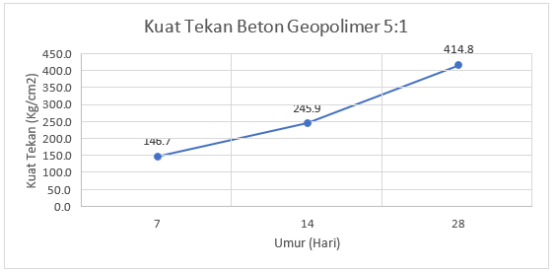
Gambar 5. Grafik Pengujian Beton Geopolimer 3:1

Dari gambar 5 diatas didapatkan kuat tekan beton geopolimer mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton. Pada umur 7 hari, rata-rata kuat tekan sebesar 29,7 kg/cm², kemudian meningkat menjadi 46,1 kg/cm² pada umur 14 hari, dan mencapai 67,9 kg/cm² pada umur 28 hari.



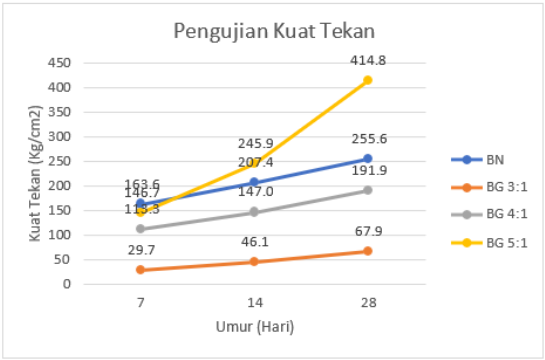
Gambar 6. Grafik Pengujian Beton Geopolimen 4:1

Pada gambar 6 hasil pengujian beton geopolimer BG 4:1, kuat tekan mengalami perkembangan yang cukup signifikan. Kuat tekan rata-rata pada umur 7 hari adalah 113,3 kg/cm², meningkat menjadi 147,0 kg/cm² pada umur 14 hari, dan mencapai 191,9 kg/cm² pada umur 28 hari, meskipun nilai kuat tekannya masih sedikit lebih rendah dari beton normal.



Gambar 7. Grafik Pengujian beton Geopolimer 5:1

Gambar 7 grafik hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer BG 5:1 menunjukkan peningkatan yang sangat signifikan. Kuat tekan pada umur 7 hari mencapai 146,7 kg/cm², meningkat menjadi 245,9 kg/cm² pada umur 14 hari, dan mencapai 414,8 kg/cm² pada umur 28 hari. Nilai ini menunjukkan bahwa beton geopolimer pada variasi BG 5:1 memiliki kekuatan yang bahkan melebihi beton normal. Dengan demikian, variasi BG 5:1 dapat dianggap sebagai komposisi yang paling optimal dalam penelitian ini untuk menghasilkan beton geopolimer dengan kuat tekan tinggi.



Gambar 8. Grafik Pengujian Beton Gabungan

Berdasarkan Gambar 8, terlihat bahwa seluruh variasi beton menunjukkan peningkatan kuat tekan seiring bertambahnya umur beton dari 7 hingga 28 hari. Beton normal (BN) memiliki kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari sebesar 255,6 kg/cm², namun variasi beton geopolimer BG 5:1 menunjukkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi, yaitu mencapai 414,8 kg/cm². Sementara itu, kuat tekan beton geopolimer dengan variasi BG 3:1 dan BG 4:1 memiliki nilai kuat tekan yang kecil dibandingkan dengan beton normal dengan umur yang sama.

3.10. Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen pada beton geopolimer mampu menghasilkan kuat tekan yang bervariasi tergantung pada rasio larutan aktivator yang digunakan. Mekanisme utama pembentukan kekuatan pada beton geopolimer berasal dari reaksi geopolimerisasi, yaitu proses polikondensasi aluminosilikat yang terdapat pada *fly ash* dengan larutan alkali. Tingkat keberhasilan proses ini dipengaruhi oleh perbandingan larutan aktivator terhadap *fly ash*, yang menentukan intensitas reaksi kimia dan pembentukan struktur ikatan polimer anorganik.

Pada variasi BG 3:1, kuat tekan yang dihasilkan relatif rendah di semua umur pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa jumlah larutan aktivator yang terbatas tidak mampu memecah dan melarutkan komponen silika dan alumina dalam *fly ash* secara optimal. Akibatnya, pembentukan gel geopolimer yang berperan sebagai pengikat utama tidak berlangsung sempurna, sehingga struktur beton yang terbentuk kurang padat dan kekuatannya rendah.

Variasi BG 4:1 menunjukkan peningkatan kuat tekan yang lebih baik. Peningkatan proporsi larutan aktivator memberikan energi kimia yang lebih besar untuk memecah struktur *fly ash*, sehingga reaksi geopolimerisasi dapat berjalan lebih efektif. Meskipun demikian, kuat tekan yang dihasilkan masih berada di bawah beton normal, kemungkinan disebabkan oleh ketidakseimbangan antara jumlah aktivator dan *fly ash*, sehingga masih terdapat pori atau rongga dalam struktur beton yang mengurangi kepadatannya.

Sementara itu, variasi BG 5:1 memberikan hasil yang paling optimal dengan nilai kuat tekan yang bahkan melebihi beton normal. Jumlah larutan aktivator yang tinggi memungkinkan pelarutan silika dan alumina secara maksimal, menghasilkan gel geopolimer dalam jumlah besar yang mengisi pori-pori dan memperkuat struktur beton. Ikatan yang terbentuk menjadi lebih rapat dan homogen, sehingga meningkatkan kepadatan serta daya tahan beton terhadap beban tekan. Hal ini membuktikan bahwa rasio larutan aktivator yang tepat dapat memaksimalkan potensi *fly ash* sebagai bahan pengikat utama tanpa memerlukan semen.

Secara keseluruhan, temuan ini menguatkan potensi beton geopolimer sebagai alternatif ramah lingkungan pengganti beton konvensional. Selain mampu mengurangi emisi karbon dengan menghilangkan penggunaan semen, penggunaan *fly ash* juga membantu memanfaatkan limbah industri, sehingga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan. Pemilihan rasio larutan aktivator yang tepat menjadi faktor kunci dalam mengoptimalkan performa beton geopolimer, di mana rasio yang terlalu rendah dapat menghambat pembentukan ikatan, sedangkan rasio yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kekuatan secara signifikan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai kuat tekan beton normal dan beton geopolimer dengan berbagai variasi dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan terhadap beton geopolimer dengan campuran *fly* ash sebagai pengganti semen, diperoleh bahwa campuran tersebut mampu menghasilkan beton dengan kuat tekan tertentu. Meskipun hanya menggunakan satu variasi campuran, hasil pengujian menunjukkan bahwa *fly* ash dapat berperan aktif dalam proses pembentukan kekuatan beton melalui reaksi geopolimerisasi.
2. Beton geopolimer yang menggunakan *fly* ash sebagai bahan pengikat utama tanpa semen juga menunjukkan peningkatan kuat tekan yang signifikan seiring bertambahnya umur beton. Masing-masing variasi menunjukkan performa yang berbeda berdasarkan rasio larutan aktivator:

   Variasi BG 3:1 menunjukkan kuat tekan yang masih rendah, yaitu 29,7 kg/cm² pada umur 7 hari, 46,1 kg/cm2 untuk umur 14 hari dan hanya 67,9 kg/cm² pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa rasio larutan aktivator yang terlalu rendah kurang mampu memicu reaksi geopolimerisasi secara optimal.

Variasi BG 4:1 menunjukkan perkembangan kuat tekan yang cukup signifikan, dari 113,3 kg/cm² pada umur 7 hari, meningkat menjadi 147,0 kg/cm² pada umur 14 hari, dan 191,9 kg/cm² pada umur 28 hari. Meskipun masih berada di bawah beton normal.

Variasi BG 5:1 memberikan hasil kuat tekan paling tinggi di antara semua variasi, yaitu 146,7 kg/cm² pada umur 7 hari, meningkat menjadi 245,9 kg/cm² pada umur 14 hari, dan mencapai 414,8 kg/cm² pada umur 28 hari. Nilai ini jauh melebihi beton normal, yang menunjukkan bahwa rasio aktivator yang tinggi mampu menghasilkan ikatan geopolimer yang kuat dan padat.

Daftar Pustaka

[1] J. Davidovits, "Geopolymers: inorganic polymeric new materials," *J Therm Anal Calorim*, vol. 37, no. 8, pp. 1633–1656, 1991.

[2] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, "Concreto," *Microestrutura, propriedades e materiais*, vol. 2, 2014.

[3] M. Solikin, "Analisis Pemakaian Kombinasi Fly Ash Tipe F Dan Slag 1: 1 Pada Beton Geopolymer Dengan Na2SiO3 Dan NaOH Sebagai Alkali Aktivator: Sebuah Kajian Literatur," *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 14, no. 1, pp. 13–20, 2021.

[4] F. Pacheco-Torgal, Z. Abdollahnejad, S. Miraldo, S. Baklouti, and Y. Ding, "An overview on the potential of geopolymers for concrete infrastructure rehabilitation," *Constr Build Mater*, vol. 36, pp. 1053–1058, 2012.

[5] Badan Standardisasi Nasional, "SNI ASTM C136-2012 : Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar," *SNI ASTM C136-2012*, pp. 1–24, 2012.

[6] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 1970-2016 :Cara uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus," *SNI 1970-2016*, no. 4, p. 20, 2016.

[7] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 1969-2016 : Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar," *SNI 1969-2016*, p. 20, 2016.

[8] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 1971-2011 : Cara uji kadar air total agregat dengan pengeringan"," *SNI 1971-2011*, pp. 1–11, 2011.

[9] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 03-4142-1996 : Metode Pengujian Jumlah Bahan dalam Agregate yang Lolos Saringan nomor 200 (0,0075 mm)," *SNI 03-4142-1996*, vol. 200, pp. 1–4, 1996.

[10] Badan Standarisasi Nasional, "SNI 03-4804-1998 : Metode Pengujian Berat Isi dan Rongga udara dalam agregat," *SNI 03-4804-1998*, pp. 1–6, 1998.

[11] SNI 2049:2015, "SNI 20149-2015 Semen Portland," *2015*, pp. 1–147, 2015.