

Contents list available at journal.uib.ac.id**Journal of Civil Engineering and Planning**Journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce>

Comparative Analysis of Concrete Compressive Strength Using GGBFS as a Cement Substitute for Normal Concrete

Analisa Perbandingan Kuat Tekan Beton Menggunakan GGBFS Sebagai Substitusi Semen Terhadap Beton Normal

Achmad Trie Mashuri¹, Ahmad Yudi², Ayu Sinta Aprilia³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera

Email korespondensi: achmad.120210181@gmail.com

INFO ARTIKEL	ABSTRAK
<p>Kata kunci :</p> <p>Beton, <i>Ground Granulated Blast Furnace Slag</i>, Semen, NaOH</p>	<p>Konstruksi-konstruksi bangunan yang ditemukan di Indonesia pada umumnya memanfaatkan beton untuk bahan struktur utama. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penggunaan <i>ground granulated blast furnace slag</i> (GGBFS) sebagai substitusi semen pada campuran beton dengan metode <i>Analysis of Variance</i> (Anova) dan <i>Tukey Method</i>. Kadar GGBFS yang digunakan adalah 0%, 25%, 30%, 35%, 40% dan 45% sebagai substitusi semen. Nilai kuat tekan rata-rata yang diperoleh pada masing-masing sampel berturut-turut adalah 25,08 MPa, 25,1 MPa, 25,7 MPa, 25,9 MPa, 26,4 MPa, 27,7 MPa dan 26,2 MPa. Nilai kuat tekan terus meningkat dengan nilai kuat tekan tertinggi pada kadar 40% dan kembali turun pada kadar 45%. Penggunaan ggbfs diperlukan aktivator untuk mempercepat sifat mekanik ggbfs itu sendiri. Aktivator yang digunakan adalah NaOH dengan konsentrasi 4 Mol.</p>
ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Keywords:</p> <p>Concrete, <i>Ground Granulated Blast Furnace Slag</i>, Cement, NaOH</p>	<p><i>Building constructions found in Indonesia generally use concrete as the main structural material. This research aims to analyze the use of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) as a cement substitute in concrete mixtures using the Analysis of Variance method (Anova) and the Tukey Method. The GGBFS levels used are 0%, 25%, 30%, 35%, 40% and 45% as cement substitute. The average compressive strength values obtained for each sample were 25.08 MPa, 25.1 MPa, 25.7 MPa, 25.9 MPa, 26.4 MPa, 27.7 MPa and 26.2 respectively. MPa. The compressive strength value continues to increase with the highest compressive strength value at 40% and decreasing again at 45%. The use of ggbfs requires an activator to accelerate the mechanical properties of ggbfs itself. The activator used is NaOH with a concentration of 4 Mol.</i></p>

1. Pendahuluan

Salah satu faktor yang menyebabkan Indonesia masih menjadi negara berkembang dikarenakan pembangunan infrastruktur yang belum optimal. Dengan adanya infrastruktur yang memadai terutama pada bidang transportasi, pendidikan, dan kesehatan dapat membuat negara Indonesia menjadi maju. Infrastruktur memadai haruslah didukung oleh struktur yang memadai dan ramah lingkungan. Struktur yang mendukung infrastruktur yaitu bangunan, Gedung, dan lain-lain [1]. Kontruksi-kontruksi bangunan yang ditemukan di Indonesia pada umumnya memanfaatkan beton untuk bahan struktur utama. Meskipun mempunyai kelebihan, beton juga mempunyai kekurangan dalam pemakaiannya yakni beton memiliki sifat yang getas sehingga praktis tidak mampu menahan tegangan tarik yang getas [2]. Beton merupakan campuran bahan bangunan yang terdiri dari tiga komponen utama: Semen Portland, agregat (pasir, kerikil, atau batu pecah), dan air.

Beton sendiri merupakan salah satu unsur yang sangat penting dalam melaksanakan pekerjaan konstruksi. Elemen ini dapat dengan mudah dibentuk sesuai kebutuhan [3]. Karakteristik beton yang sering dijumpai di masyarakat, memiliki densitas sebesar 2,0-2,5 gr/cm, dan kuat tekan 3-50 MPa [4]. Pada campuran beton, terdapat bahan-bahan yang dapat dicampurkan dengan bahan lainnya seperti *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) yang dimana bahan ini merupakan green bulding yang dikembangkan oleh PT. Krakatau Semen Indonesia. *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) ini digunakan sebagai substitusi semen.

Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) merupakan produk samping proses pembuatan besi dan baja dengan metode *blast furnace* menjadi *green building* dan menjadi salah satu alternatif yang dapat digunakan karena bahan ini ramah lingkungan. *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) memiliki kandungan utama yaitu *Calcium Oxide* (CaO) 37%, *Aluminium Trioxide* (Al₂O₃) 16%, *Magnesium Oxide* (MgO) 10%, *Silicon Oxide* (SiO₂) 40%, *Loss On Ignition* (LOI) 3%, *Chloride* (Cl) 0,1%, Kelembaban (*Moisture*) 1%, dan Kaca (*Glass Content*) 97% [5]. GGBFS digunakan sebagai pengganti semen dengan variasi 25%, 30%, 35% 40% dan 45%. Metode *mixed design* yang digunakan adalah SNI 7656-2012. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kuat tekan beton dengan campuran semen *slag* atau *Ground Granulated Blast Furnace Slag* sebagai substitusi semen dalam berbagai persentase. Hal ini dapat mengurangi penggunaan energi, mengurangi limbah akibat pembuatan baja, serta dapat meningkatkan kualitas kesehatan karena berkurangnya limbah disekitar masyarakat.

2. Tinjauan Pustaka

Penelitian tentang pengujian kuat tekan beton sudah sering dilakukan oleh para mahasiswa maupun suatu perusahaan yang bergerak dalam bidang konstruksi bahan yang terbuat dari beton. Penelitian tersebut biasanya membandingkan antara beton normal dengan beton dengan campuran bahan tambahan/bahan pengganti seperti GGBFS yang digunakan untuk mengganti substitusi semen. Nilai kuat tekan beton yang digunakan yaitu pada hari ke-28 agar mendapatkan nilai kuat tertinggi. Nilai kuat tekan beton pada penilitian ini menggunakan mutu beton $F_c' 25$ MPa.

Pada penelitian terdahulu telah membandingkan kuat tekan beton normal dengan kuat tekan beton yang mengandung *Ground Granulated Blast Furnace Slag* pada umur awal beton. Penilitian ini menggunakan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* sebagai pengganti semen dengan substitusi sebesar 0%, 50%, dan 70%. Dimana nilai kuat tekan beton normal pada hari ke-3 sebesar 32,59 MPa, hari ke-7 sebesar 34,49 MPa, hari ke-14 sebesar 37,81 MPa, hari ke-28 sebesar 42,73 MPa, dan hari ke-60 sebsar 45,68 MPa. Pada kuat tekan beton dengan substitusi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* sebesar 50% didapatkan nilai kuat tekan pada hari ke-3 sebsar 28,97 MPa, hari ke-7 sebesar 32,58 MPa, hari ke-14 sebesar 36,75 MPa, hari ke-28 sebesar 42,12 MPa, dan hari ke-60 sebsar 45,38 MPa. Pada kuat tekan beton dengan substitusi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* sebesar 70% didapatkan nilai kuat tekan

pada hari ke-3 sebesar 25,82 MPa, hari ke-7 sebesar 28,90 MPa, hari ke-14 sebesar 33,71 MPa, hari ke-28 sebesar 38,66 MPa, dan hari ke-60 sebesar 41,27 MPa [6].

Penelitian lainnya juga membandingkan kuat tekan beton normal dengan kuat tekan beton yang mengandung *Ground Granulated Blast Furnace Slag* pada umur awal beton. Penelitian ini menggunakan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* sebagai pengganti semen dengan substitusi sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%. Dimana nilai kuat tekan beton dilihat di hari ke-28. Pada beton normal sebesar 38,212 MPa. Pada substitusi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* 10% didapatkan nilai kuat tekan sebesar 33,628 MPa. Pada substitusi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* 20% didapatkan nilai kuat tekan sebesar 35,065 MPa. Pada substitusi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* 30% didapatkan nilai kuat tekan sebesar 28,539 MPa. Pada substitusi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* 40% didapatkan nilai kuat tekan sebesar 26,978 MPa. Pada substitusi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* 50% didapatkan nilai kuat tekan sebesar 26,920 MPa [7].

Selain itu, ada juga penelitian lain yang menggunakan cetakan silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm, membandingkan kuat tekan beton normal dengan kuat tekan beton yang mengandung *Ground Granulated Blast Furnace Slag* pada umur awal beton. Penelitian ini menggunakan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* sebagai pengganti semen dengan substitusi sebesar 0%, 20%, 40% dan 60%. Dimana nilai kuat tekan beton normal pada hari ke-3 sebesar 27,46 MPa, hari ke-7 sebesar 28,22 MPa, hari ke-14 sebesar 40,39 MPa, hari ke-28 sebesar 44,82 MPa. Pada beton dengan substitusi 20% nilai kuat tekan pada hari ke-3 sebesar 29,72 MPa, hari ke-7 sebesar 38,03 MPa, hari ke-14 sebesar 42,56 MPa, hari ke-28 sebesar 49,16 MPa. Pada beton dengan substitusi 40% nilai kuat tekan pada hari ke-3 sebesar 20,95 MPa, hari ke-7 sebesar 38,78 MPa, hari ke-14 sebesar 46,24 MPa, hari ke-28 sebesar 50,39 MPa. Pada beton dengan substitusi 60% nilai kuat tekan pada hari ke-3 sebesar 14,25 MPa, hari ke-7 sebesar 30,1 MPa, hari ke-14 sebesar 37,4 MPa, hari ke-28 sebesar 44,07 MPa [8].

Beton yang baik dapat dilihat dari kuat tekan beton yang dihasilkan, semakin tinggi nilai kuat tekan beton maka semakin baik pula mutu atau kualitas dari beton tersebut. Kuat tekan beton ini menjadi parameter utama yang digunakan untuk mengetahui gambaran tentang sifat mekanisnya dari beton itu sendiri [9]. Kuat tekan beton adalah kemampuan beton dalam menahan tekanan pada satuan luas permukaan beton [10]. Alat yang digunakan dalam pengujian kuat tekan beton pada penelitian ini adalah *compression testing machine*. Adapun rumus yang digunakan dalam menghitung kuat tekan beton sebagai berikut :

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

Keterangan :

$f'c$ = Kuat Tekan (MPa)

P = Tekanan yang dihasilkan (N)

A = Luas penampang beton (mm²)

Kuat tekan beton bisa disesuaikan dengan umur beton dalam. Nilai kuat tekan beton ini dilihat dalam persentase. Nilai kuat tekan beton sesuai dengan umur rencana beton dilihat dari konversi kuat tekan beton yang tercantum dalam PBI [11].

Tabel 1. Hubungan Umur Beton Terhadap Kuat Tekan Beton

Umur (hari)	Kuat Tekan Beton (%)
3	40
7	65
14	88
21	95

Umur (hari)	Kuat Tekan Beton (%)
28	100
90	120
365	135

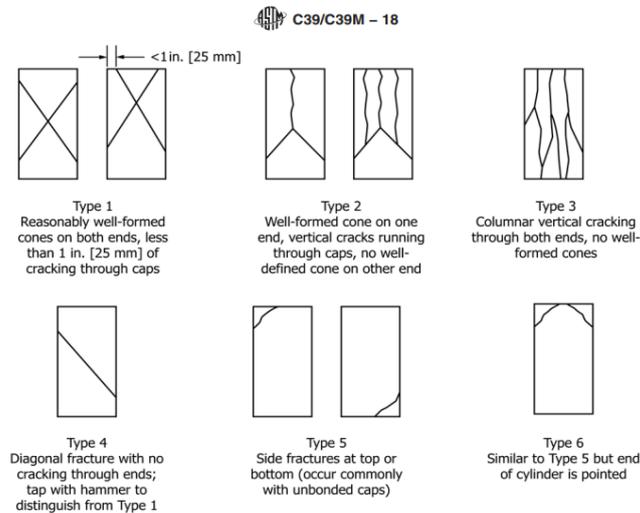
Sumber : PBI (1971)

Tabel 2. Hubungan Dimensi Beton Terhadap Kuat Tekan Beton

Diameter (mm)	Tinggi (mm)	Faktor Koreksi
50	100	1,09
75	150	1,06
100	200	1,04
125	250	1,02
150	300	1,00
175	350	0,98
200	400	0,96
250	500	0,93
300	600	0,91

Sumber : SNI 1974-2011

Tipe keretakan pada beton dibedakan menjadi 6 tipe [12]. Berikut merupakan tipe keretakan pada beton berdasarkan ASTM C39:



Gambar 1. Tipe Keretakan Beton

Sumber : ASTM C39

3. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimental, dimana peneliti melakukan pengujian dan penelitian di laboratorium teknik sipil itera. Adapun tahapan pada penelitian ini diawali dengan studi literatur, persiapan alat dan bahan, pengujian *properties* material, *mix design*, pembuatan benda uji, pengujian benda uji, pembahasan analisis serta kesimpulan dan saran.

3.1. Material

Material yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Semen *portland* tipe 1;

2. Agregat yaitu batu pecah yang berasal dari Kabupaten Lampung Tengah;
3. Pasir yang berasal dari Kabupaten Lampung Tengah;
4. *Ground Granulated Blast Furnace Slag* yang berasal dari PT. Krakatau Semen Indonesia;
5. Air yang berasal dari laboratorium teknik sipil Institut Teknologi Sumatera.

3.2. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini digunakan untuk melakukan pengujian *properties*, pembuatan benda uji, perawatan benda uji, serta pengujian kuat tekan. Adapun alat-alat yang digunakan antara lain: satu set saringan, timbangan, sekop, kontainer, oven, apparatus, botol kaca, botol *le chateriel*, satu set alat vicat, *mixer*, *mould* dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm, batang besi penumbuk, pisau perata, alat uji kuat tekan (*compression testing machine*) dan alat lainnya. Alat uji kuat tekan yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. *Compression Testing Machine*

3.3. Pengujian Material

Pengujian agregat dilakukan untuk melihat nilai pengujian yang dilakukan apakah agregat tersebut memenuhi standar untuk bahan material campuran beton dengan mempertimbangkan standar nilai yang telah ditetapkan. Pengujian material yang dilakukan pada penelitian ini diantaranya, berat volume, analisis saringan, kadar air, kadar lumpur agregat halus, zat organik agregat halus, keausan agregat kasar, berat jenis dan penyerapan air, berat jenis semen dan waktu ikat semen.

3.4. Perencanaan Campuran Beton (*Mix Design*)

Mix design pada penelitian ini menggunakan standar yang telah ditetapkan pada SNI 7656:2012. Pada perencanaan pembuatan beton digunakan *mould* dengan diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dengan $f'c$ sebesar 25 MPa. Sampel beton terdiri dari 5 variasi dan 1 sampel normal dengan total sampel 18 buah dengan umur beton 28 hari. Adapun variasi GGBFS yang digunakan yaitu: 25%, 30%, 35%, 40% dan 45% sebagai substitusi semen *portland*.

3.5. Pembuatan Benda Uji

Pada pembuatan benda uji, hal yang harus diperhatikan pertama kali adalah perhitungan kebutuhan material yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji (*job mix formula*). Setelah perhitungan sudah sesuai, material yang akan digunakan harus ditimbang sesuai dengan perhitungan yang telah dilakukan sebelum. Setelah material sudah siap, dilakukan proses pencampuran menggunakan mesin *mixer* dengan memasukkan semua bahan ke dalam mesin tersebut hingga material tercampur secara homogen. Setelah proses pencampuran selesai, dilakukan proses uji *slump* untuk mengetahui kekentalan campuran tersebut. Apabila pengujian *slump* telah memenuhi standar, beton segar tersebut dapat dimasukkan ke dalam *mould*, dipadatkan dan ditumbuk menggunakan batang besi

penumbuk lalu pada bagian sisi luar *mould* dipukul menggunakan palu karet hingga udara pada cetakan keluar semua. Setelah itu, meratakan permukaan menggunakan pisau perata.

3.6. Perawatan dan Pengujian Benda Uji

Perawatan benda uji yang dilakukan pada penelitian ini adalah dengan cara merendam benda uji ke dalam bak berisi air. Proses perendaman (*curing*) ini dilakukan ± 24 jam setelah proses pencetakan beton. Perendaman dilakukan selama 26 hari dan 1 hari dikeringkan pada suhu ruang. Setelah benda uji dikeringkan selama ± 24 jam, proses selanjutnya adalah melakukan uji kuat tekan benda uji menggunakan mesin CTM (*compression testung machine*).

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil Pengujian Material

Hasil data pengujian agregat yaitu batu pecah dan pasir, dimana kedua agregat ini berasal dari Kabupaten Lampung Tengah terdiri dari berat volume, modulus kehalusan, berat jenis dan penyerapan air. Hasil pengujian yang menunjukkan bahwa agregat yang digunakan telah memenuhi standar sehingga dapat digunakan sebagai bahan material penyusun beton. Adapun hasil Pengujian agregat dapat dilihat pada tabel 3.

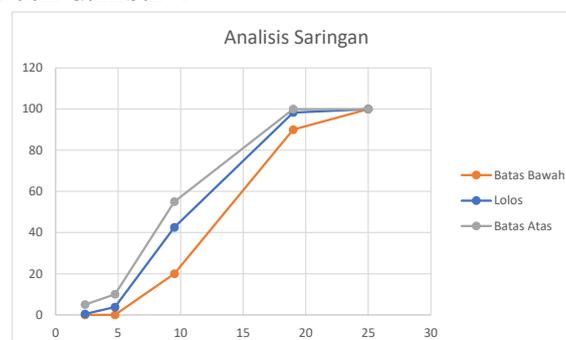
Tabel 3. Hasil Pengujian Material

Jenis Pengujian	Agregat Kasar	Agregat Halus
Berat Volume (kg/m^3)	1333,961	1414,523
Modulus Kehalusan	6,55	2,714
Berat Jenis	2,5063	2,5253
Penyerapan (%)	2,77	1,63

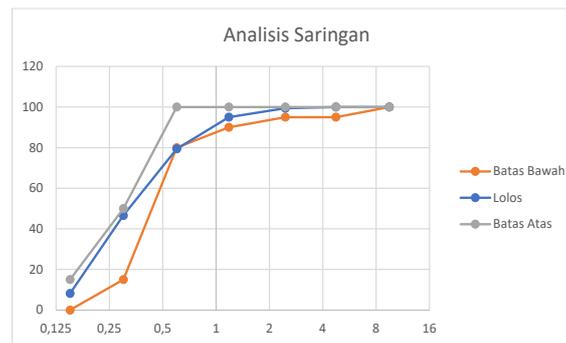
Hasil dari pengujian ini telah memenuhi syarat. Menurut ASTM C127 dan ASTM C128 nilai berat jenis agregat kasar yaitu 2,5 – 2,7 dan Nilai penyerapan agregat kasar yaitu 0,5% - 4% [13]. Nilai berat jenis agregat halus yaitu 2,5 – 2,8. dan penyerapan agregat halus yaitu 0,5% - 3% [14]. Menurut SNI ASTM C136:2012 nilai modulus kehalus agregat kasar yaitu 6 – 8 dan modulus kehalusan agregat halus yaitu 1,5 – 3,8 [15]. Dari hasil pengujian diastis, material yang digunakan telah memenuhi standar yang ditetapkan SNI, dimana hal itu menunjukkan bahwa material tersebut dapat digunakan sebagai bahan material penyusun beton.

4.2. Hasil Pengujian Gradasi Agregat

Hasil pengujian gradasi agregat atau analisis saringan pada penelitian ini yang dimana mengacu pada SNI 03-2834-2000. Pada pengujian analisis saringan agregat halus didapatkan hasil yang dimana agregat halus yang telah diuji termasuk dalam gradasi zona 4 [16]. Hasil gradasi pada pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Grafik Gradasi Agregat Kasar



Gambar 4. Grafik Gradasi Agregat Halus

Dari grafik tersebut, agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran maksimal agregat sebesar 20 mm, dan agregat halus yang digunakan berada pada zona 4 (pasir sangat halus). Pada setiap sampel gradasi ini harus selalu diperhatikan untuk mendapatkan hasil yang diinginkan.

4.3. Hasil Perhitungan Perencanaan Campuran Beton (*job mix formula*)

Perhitungan perencanaan campuran beton harus dilakukan agar menghasilkan beton dengan mutu yang telah direncanakan yaitu sebesar 25 MPa. Setelah material yang telah diuji dan diketahui nilainya, material dapat dihitung untuk merencanakan campuran beton dengan mengacu pada SNI 7656-2012 [17]. Hasil pada perencanaan campuran beton tersebut memperhitungkan untuk setiap 1 m³ dalam satuan kilogram (kg) dimana hasil tersebut dikonversikan untuk membuat sesuai ukuran *mould* dan juga banyaknya sampel pada setiap variasi. Hasil perhitungan pencampuran beton dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Data Perhitungan Campuran Beton (kg)

Material	Beton Normal	Variasi 25%	Variasi 30%	Variasi 35%	Variasi 40%	Variasi 45%
Semen	2,148	1,607	1,499	1,391	1,284	1,176
Air	1,265	0,496	0,883	0,819	0,756	0,693
Agregat Kasar	5,417	5,417	5,417	5,417	5,417	5,417
Agregat Halus	5,395	5,395	5,395	5,395	5,395	5,395
GGBFS	-	0,541	0,649	0,757	0,864	0,972
NaOH	-	0,319	0,382	0,446	0,509	0,572

Dari hasil tabel diatas, didapatkan kebutuhan pada setiap sampel variasi, dengan kebutuhan agregat kasar dan halus tetap sama di semua variasi. Agregat kasar dibutuhkan sebanyak 5,417 kg, dan agregat halus sebanyak 5,395 kg. Kebutuhan semen dengan kadar GGBFS 0%, 25%, 30%, 35%, 40%, dan 45% secara berturut-turut sebanyak 2,148 kg, 1,607 kg, 1,499 kg, 1,391 kg, 1,284 kg, dan 1,1776 kg. Kebutuhan GGBFS dengan kadar GGBFS 25%, 30%, 35%, 40%, dan 45% secara berturut-turut sebanyak 0,541 kg, 0,649 kg, 0,757 kg, 0,864 kg, dan 0,972 kg. Kebutuhan NaOH 4 mol dengan kadar GGBFS 25%, 30%, 35%, 40%, dan 45% secara berturut-turut sebanyak 0,319 kg, 0,382 kg, 0,446 kg, 0,509 kg dan 0,572 kg.

4.4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Hasil pengujian kuat tekan beton dilakukan setelah beton mencapai umur 28 hari dengan menggunakan badan uji silinder dengan ukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Dengan luas

permukaan sebesar 7853,981634 mm² terhadap 18 sampel beton. Adapun hasil pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Kadar Variasi	Kode Sampel	Beban Maksimal (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
0%	Normal 01	162,5	24,45	25,08
	Normal 02	170	25,58	
	Normal03	167,5	25,20	
25%	V25 01	190	25,16	25,71
	V25 02	197,5	26,15	
	V25 03	195	25,82	
30%	V30 01	195	25,82	25,93
	V30 02	197,5	26,15	
	V30 03	195	25,82	
35%	V35 01	205	27,15	26,37
	V35 02	197,5	26,15	
	V35 03	195	25,82	
40%	V40 01	210	27,81	27,70
	V40 02	212,5	28,14	
	V40 03	205	27,15	
45%	V45 01	197,5	26,15	26,15
	V45 02	205	27,15	
	V45 03	190	25,16	

Dari tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa nilai kuat tekan yang dihasilkan dengan campuran ggbfs sebagai substitusi semen terus meningkat hingga kadar 40% dan terjadi penurunan pada kadar 45%. Peningkatan kuat tekan ini disebabkan oleh senyawa Ca (kalsium) pada GGBFS lebih tinggi dibandingkan semen. Akan tetapi penurunan yang terjadi pada kadar 45% disebabkan oleh senyawa Mg (Magnesium) pada GGBFS lebih tinggi dibandingkan semen. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa penggunaan GGBFS dapat meningkatkan nilai kuat tekan dengan batas kadar tertentu.

4.5. Hasil Pengujian *Analysis Of Variance (ANOVA)* dan *Tukey Method*

Anova digunakan sebagai analisis guna menguji hipotesis yang menilai adakah perbedaan rerata data antar kelompok. Hasil akhir dari anova berupa *F test*. Nilai *F* yang dihasilkan akan dibandingkan dengan nilai *F* tabel. Jika nilai *F* hasil anova lebih dari *F* tabel maka dapat disimpulkan perbedaan rata-rata pada semua kelompok. Pada penelitian kali ini menggunakan analisis anova 1 arah (*One-Way Anova*). *Tukey Method* adalah metode uji lanjutan yang digunakan apabila kesimpulan pada hasil anova menolak *H0*. Hasil pengujian Anova dan *Tukey Method* dapat dilihat pada Tabel 6 sampai dengan Tabel 9.

Tabel 6. Data Uji Statistik Anova

Umur Beton	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X12	X22	X32	X42	X53	X62
28	24,45	25,16	25,82	27,15	27,81	26,15	597,9	632,99	666,74	736,88	773,26	683,94
	25,58	26,15	26,15	26,15	28,14	27,15	654,36	683,94	683,94	683,94	791,78	736,88
	25,2	25,82	25,82	25,82	27,15	25,16	635,26	666,74	666,74	666,74	736,88	632,99
Jumlah	75,24	77,13	77,79	79,12	83,09	78,46	1887,52	1983,67	2017,42	2087,56	2301,92	2053,81

Tabel 7. *Analysis Of Variance*

Sumber Variansi	JK	df	VAR	F-Hitung	F-Tabel
Antar Kelompok	11,49	5	2,30		
Dalam Kelompok	4,68	12	0,39	5,90	3,49
Total	16,17	17	2,69		

Tabel 8. Data *Tukey Method*

Umur Beton	X1	X2	X3	X4	X5	X6
	24,45	25,16	25,82	27,15	27,81	26,15
28	25,58	26,15	26,15	26,15	28,14	27,15
	25,20	25,82	25,82	25,82	27,15	25,16
Rata-Rata	25,08	25,71	25,93	26,37	27,70	26,15

Tabel 9. *Tukey Method*

Sampel Tukey	Selisih Data	Ti	Kesimpulan
(1,2)	0,63	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(1,3)	0,85	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(1,4)	1,29	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(1,5)	2,62	1,71	Berbeda, Signifikan
(1,6)	1,07	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(2,3)	0,22	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(2,4)	0,66	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(2,5)	1,99	1,71	Berbeda, Signifikan
(2,6)	0,44	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(3,4)	0,44	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(3,5)	1,77	1,71	Berbeda, Signifikan
(3,6)	0,22	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(4,5)	1,32	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(4,6)	0,22	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan
(5,6)	1,54	1,71	Berbeda,Tidak Signifikan

Tabel 10. F Tabel untuk Probabilitas = 0,05

df untuk penyebut (N2)	df untuk pembilang (N1)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	161	199	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	245	246
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.31	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.40	19.41	19.42	19.42	19.43
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.76	8.74	8.73	8.71	8.70
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.94	5.91	5.89	5.87	5.86
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.70	4.68	4.66	4.64	4.62
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.98	3.96	3.94
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.60	3.57	3.55	3.53	3.51
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.31	3.28	3.26	3.24	3.22
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.10	3.07	3.05	3.03	3.01
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.94	2.91	2.89	2.86	2.85
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.82	2.79	2.76	2.74	2.72
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.72	2.69	2.66	2.64	2.62
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.63	2.60	2.58	2.55	2.53
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.57	2.53	2.51	2.48	2.46
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.40
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.46	2.42	2.40	2.37	2.35
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.41	2.38	2.35	2.33	2.31
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.31	2.29	2.27
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.34	2.31	2.28	2.26	2.23
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.31	2.28	2.25	2.22	2.20
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.28	2.25	2.22	2.20	2.18
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.26	2.23	2.20	2.17	2.15
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.24	2.20	2.18	2.15	2.11
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.22	2.18	2.15	2.13	2.11
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.20	2.16	2.14	2.11	2.09
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.18	2.15	2.12	2.09	2.06
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.17	2.13	2.10	2.08	2.06
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.15	2.12	2.09	2.06	2.04
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.14	2.10	2.08	2.05	2.03
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.13	2.09	2.06	2.04	2.01
31	4.16	3.30	2.91	2.68	2.52	2.41	2.32	2.25	2.20	2.15	2.11	2.08	2.05	2.03	2.00
32	4.15	3.29	2.90	2.67	2.51	2.40	2.31	2.24	2.19	2.14	2.10	2.07	2.04	2.01	1.99
33	4.14	3.28	2.89	2.66	2.50	2.39	2.30	2.23	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	2.00	1.98
34	4.13	3.28	2.88	2.65	2.49	2.38	2.29	2.23	2.17	2.12	2.08	2.05	2.02	1.99	1.97
35	4.12	3.27	2.87	2.64	2.49	2.37	2.29	2.22	2.16	2.11	2.07	2.04	2.01	1.99	1.96
36	4.11	3.26	2.87	2.63	2.48	2.36	2.28	2.21	2.15	2.11	2.07	2.03	2.00	1.98	1.95
37	4.11	3.25	2.86	2.63	2.47	2.36	2.27	2.20	2.14	2.10	2.06	2.02	2.00	1.97	1.94
38	4.10	3.24	2.85	2.62	2.46	2.35	2.26	2.19	2.14	2.09	2.05	2.02	1.99	1.96	1.93
39	4.09	3.24	2.85	2.61	2.46	2.34	2.26	2.19	2.13	2.08	2.04	2.01	1.98	1.95	1.93
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.04	2.00	1.97	1.95	1.92
41	4.08	3.23	2.83	2.60	2.44	2.33	2.24	2.17	2.12	2.07	2.03	2.00	1.97	1.94	1.92
42	4.07	3.22	2.83	2.60	2.44	2.32	2.24	2.17	2.11	2.06	2.03	1.99	1.96	1.94	1.91
43	4.07	3.21	2.82	2.59	2.43	2.32	2.23	2.16	2.11	2.06	2.02	1.99	1.96	1.93	1.91
44	4.06	3.21	2.82	2.58	2.43	2.31	2.23	2.16	2.10	2.05	2.01	1.98	1.95	1.92	1.90
45	4.06	3.20	2.81	2.58	2.42	2.31	2.22	2.15	2.10	2.05	2.01	1.97	1.94	1.92	1.89

Sumber : Junaidi (2010)

Berdasarkan Data Hasl Perhitungan anova dab *Tukey Method* didapatkan beberapa nilai F-Hasil sebesar 5,90 dan nilai F-Tabel 3,49. Dapat disimpulkan bahwa nilai F-Hasil > F-Tabel. Maka H0 ditolak, artinya ada pengaruh antara nilai kuat tekan dengan penggunaan GGBFS sebagai substitusi semen. Nilai *tukey* kritis berada pada angka 1,71 dimana nilai ini yang menunjukkan perbedaan rata-rata pada hasil yang didapatkan. Dengan hasil data *tukey method* ini dapat disimpulkan bahwa grup 5 (X5) dengan substitusi GGBFS sebesar 40% menjadi nilai optimal dibandingkan grup 2 (X2) dengan substitusi GGBFS sebesar 25%, grup 3 (X3) dengan substitusi GGBFS sebesar 30%, grup 4 (X4) dengan substitusi GGBFS sebesar 35% dan grup 6 (X6) dengan substitusi GGBFS sebesar 45%. Dari data yang telah didapatkan ini, menunjukkan bahwa substitusi GGBFS dapat digunakan sebagai beton struktural dengan menggunakan rumus ekuivalensi dengan menambahkan NaOH sebagai aktifator sebesar 4 Mol.

4.6. Tipe Keretakan Pada Sampel Beton Silinder

Tipe keretakan pada beton menegacu pada standar ASTM C39-18 dimana terdapat 6 tipe keretakan yang terjadi pada beton [12]. berikut beberapa tipe keretakan disetiap masing-masing variasi beton yang terjadi pada penelitian ini:



Gambar 5. Keretakan Beton Normal



Gambar 6. Keretakan Beton Variasi GGBFS 25%



Gambar 7. Keretakan Beton Variasi GGBFS 30%



Gambar 8. Keretakan Beton Variasi GGBFS 35%



Gambar 9. Keretakan Beton Variasi GGBFS 40%



Gambar 10. Keretakan Beton Variasi GGBFS 45%

Pada gambar tersebut, dapat kita lihat secara visual, dimana keretakan yang terjadi pada beton normal termasuk kedalam tipe keretakan nomor 4. Pada beton variasi ggbfs 25% termasuk kedalam tipe keretakan nomor 4. Pada beton variasi ggbfs 30% termasuk kedalam tipe keretakan nomor 2. Pada beton variasi ggbfs 35% termasuk kedalam tipe keretakan nomor 3. Pada beton variasi ggbfs 40% termasuk kedalam tipe keretakan nomor 3. Pada beton variasi ggbfs 45% termasuk kedalam tipe keretakan nomor 4.

4.7. Pembahasan

Hasil dari pengujian material penyusun beton dengan menguji agregat kasar, agregat halus, semen, dan GGBFS. Agregat kasar dilakukan uji berat volume, analisis saringan, berat jenis dan penyerapan dan kadar air. Agregat halus dilakukan uji berat volume, analisis saringan, berat jenis dan penyerapan, kadar air, kadar lumpur dan zat organik. Semen dilakukan uji berat jenis dan waktu ikat semen (*setting time*). Sedangkan GGBFS dilakukan uji berat jenis dan waktu ikat semen (*setting time*) dan XRF. Dari hasil pengujian tersebut material penyusun beton yang akan digunakan telah memenuhi standar SNI yang telah ditetapkan pada setiap pengujian.

Pada hasil pengujian analisis saringan, didapatkan grafik gradasi pada masing-masing agregat. Pada agregat kasar mendapatkan hasil gradasi pada ukuran agregat maksimal 20 mm. Pada agregat halus didapatkan hasil gradasi pada zona 4 (pasir sangat halus). Hasil dari gradasi ini harus selalu diperhatikan saat akan melakukan langkah selanjutnya dalam pembuatan campuran beton (*job mix design*).

Pada hasil pengujian kuat tekan didapatkan kuat tekan rata-rata dengan kadar GGBFS 0%, 25%, 30%, 35%, 40%, dan 45% secara berturut-turut sebesar 25,08 MPa, 25,71 MPa, 25,93 MPa, 26,37 MPa, 27,7 MPa dan 26,15 MPa. Peningkatan kuat tekan ini disebabkan oleh kandungan Ca (kalsium) pada GGBFS lebih tinggi dibandingkan dengan kandungan Ca pada semen. Akan tetapi terjadinya penurunan pada kadar GGBFS 45% disebabkan oleh kandungan Mg (magnesium) pada GGBFS lebih tinggi dibandingkan kandungan Mg pada semen.

Hasil dari perhitungan anova menunjukkan bahwa adanya pengaruh terhadap penggunaan GGBFS sebagai substitusi semen pada kuat tekan beton yang dapat dilihat pada $F_{hitung} > F_{tabel}$ 5% yang artinya perlakuan tersebut berpengaruh nyata. Uji metode tukey mendapatkan symbol yang berbeda dengan hasil yang signifikan/tidak signifikan antara sampel satu dengan sampel yang lain. Pada hasil pengecekan keretakan yang terjadi pada masing-masing sampel disetiap kadar GGBFS, didapatkan keretakan beton no 2, 3, dan 4. Hasil ini menyatakan bahwa *mix design* yang kurang teliti menyebabkan ketidak homogenan saat pencampuran material, sampel yang tidak rata, permukaan sampel/alat kuat tekan terdapat kotoran dan perlunya kalibrasi ulang terhadap alat *compression testing machine* saat akan melakukan uji kuat tekan.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Pada umur beton 28 hari didapatkan nilai kuat tekan rata-rata pada kadar GGBFS 0%, 25%, 30%, 35%, 40%, dan 45% secara berturut-turut sebesar 25,08 MPa, 25,71 MPa, 25,93 MPa, 26,37 MPa, 27,7 MPa dan 26,15 MPa. Terjadi kenaikan kuat tekan semakin meningkatnya penggunaan GGBFS sebagai substitusi semen, namun kenaikan optimum terdapat pada beton variasi GGBFS 40% dengan hasil kuat tekan sebesar 27,7 MPa. Berdasarkan hasil uji kuat tekan beton, senyawa yang berpengaruh dalam peningkatan kuat tekan beton adalah Ca (kalsium), dan senyawa yang berpengaruh dalam penurunan kuat tekan beton yang terjadi pada kadar GGBFS 45% adalah Mg (magnesium) akan tetapi hasil kuat tekan pada kadar GGBFS ini masih lebih tinggi dibandingkan kuat tekan beton normal yang dimana hasil pada kadar GGBFS 45% sebesar 26,15 MPa sedangkan pada beton normal sebesar 25,08 MPa. Berdasarkan hasil pengamatan yang dilakukan pada jenis keretakan, dapat disimpulkan bahwa sebelum melakukan uji kuat tekan ada beberapa hal yang harus diperhatikan seperti saat pencampuran agregat, membersihkan permukaan alat uji kuat tekan dan juga sampel yang akan dilakukan uji kuat tekan, kalibrasi ulang alat kuat tekan (*compression testing machine*).

5.2. Saran

Disarankan untuk penelitian selanjutnya dapat menggunakan kadar NaOH, dan juga menggunakan aktifator tambahan seperti Na_2SiO_3 atau yang lainnya. Untuk dapat menggunakan metode lain saat *mix design* seperti membuat binder terlebih dahulu (mencampurkan GGBFS dengan aktifator terlebih dahulu sebelum melakukan *mix design* dengan material lainnya. Disarankan agar setiap melakukan pengujian kuat tekan untuk dilakukan pembersihan terlebih dahulu agar tidak ada agregat yang menonjol dan mengakibatkan beban hanya berfokus pada beberapa titik dan tidak merata. Disarankan agar alat *compression testing machine* dikalibrasi ulang dan di cek menggunakan *waterpass* agar dapat dilihat kemiringan alat nya setiap akan dilakukan pengujian kuat tekan.

Ucapan Termakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada orang tua yang telah memberi dukungan financial terhadap penelitian ini. Penulis berterimakasih terhadap para bapak/ibu dosen yang selama ini telah memberikan ilmu dalam pelaksanaan mata kuliah yang terkait dalam pengerjaan penelitian ini. Penulis juga berterimakasih kepada semua pihak yang telah mendukung serta membantu agar terlaksananya penelitian ini.

Daftar Rujukan

- [1] Arie Marselino Liang and Koespiadi, "Pengaruh Mutu Material Bton Terhadap Efisiensi Biaya Pembangunan Gedung Bertingkat," 2019.
- [2] F. Faldo, M. Hudori, K. Kunci, B. Campuran, T. Beton, and S. Polypropylene, "Pengaruh Efektifitas Penggunaan Serat Polypropylene Terhadap Kuat Tekan Beton Normal," *Journal of Civil Engineering and Planning*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [3] R. Pujantara, "Struktur Beton Bertulang dalam Perspektif Struktur Beton Bertulang dalam Perspektif Fleksibilitas Bentuk dan Arsitektur Plastis pada Rancangan Dekonstruksi," 2014.
- [4] R. P. Herdiamsyah dan Mekar, "Pengaruh Batu Cadas (Batu Trass) Sebagai Bahan Pembentuk Beton Terhadap Kuat Tekan Beton," 2013.
- [5] PT Krakatau Semen Indonesia, "Aplikasi Material GGBFS pada Infrastruktur Ramah Lingkungan Berperforma Tinggi," 2020.
- [6] Rano Noviana Anwar, Abdul Chalid, and Chandra Afriade Siregar, "Pengaruh Ground Granulated Blast Furnace (GGBF) Slag Sebagai Bahan Tambah Ssbagian Semen Terhadap Kuat Tekan Beton," Bulan Maret Tahun, 2023.
- [7] B. H. Setiadji, H. Dewabrata, H. Ay Lie, and S. A. P. Subagyo, "Studi Penggunaan Semen Slag sebagai Substitusi Semen Portland pada Beton," *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, vol. 6, no. 2, pp. 117–128, Oct. 2020, doi: 10.31849/siklus.v6i2.4595.
- [8] R. N. Arini, N. Warastuti, M. Wahyu, and K. Darmawan, "Analisis Kuat Tekan dengan Aplikasi Ground Granulated Blast Furnace Slag Sebagai Pengganti Sebagian Semen pada Campuran Beton," 2019.
- [9] Y. Setyaning Astutik, "Studi Komparatif Kerusakan Beton pada Struktur Kolom yang Keropos dengan Metode Grouting," 2020.
- [10] BSN, "SNI 1974:2011 Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder," 2011, [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [11] Cipta Karya, "Peraturan Beton Bertulang Indonesia," 1971.
- [12] ASTM, "ASTM C39 Standard Test Methodfor Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens," 2018.
- [13] ASTM C127, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate 1," 2009. [Online]. Available: www.astm.org,
- [14] ASTM C128, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate 1," 2009. [Online]. Available: www.astm.org,

- [15] BSN, "SNI ASTM C136:2012 Metode Uji Untuk Analisis Saringan Agregat Halus dan Agregat Kasar," 2012. [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [16] BSN, "SNI 03-2834-2000 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal," 2000.
- [17] BSN, "SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran Untuk Beton Normal, Beton Berat dan Beton Massa," 2012. [Online]. Available: www.bsn.go.id