PEMANFAATAN LIMBAH *GROUND GRANULATED BLAST FURNACE SLAG* (GGBFS) DAN *FLY ASH* SEBAGAI PENGGANTI SEBAGIAN SEMEN PADA KUAT TEKAN BETON

Reni Raafidiani[1)], Asti Aprillia Rekta Putri[2)] , Aditia Febriansya[3)]
Program Studi Konstruksi Bangunan, Politeknik TEDC[1),2)]
Program Studi Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung[3)]
Email: reniraaf@poltektedc.ac.id[1)], putrirekta@gmail.com[2)] , aditiaf8@polban.ac.id[3)]

Abstrak
Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) dan Fly Ash merupakan dua material hasil samping dari proses industri yang memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton. GGBFS merupakan limbah dari proses peleburan bijih besi di industri baja, yang setelah didinginkan dan digiling menjadi bubuk halus, dapat memberikan sifat pozzolanik dan cementitious. Sedangkan Fly Ash adalah abu sisa pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang juga memiliki karakteristik pozzolanik. Penggunaan GGBFS dan Fly Ash tidak hanya mengurangi kebutuhan semen portland, tetapi juga memberikan berbagai keuntungan teknis, seperti meningkatkan durabilitas beton, mengurangi panas hidrasi dan meningkatkan kekuatan jangka panjang. Di sisi lain, pemanfaatan material ini juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi limbah industri dan menurunkan emisi karbon. Penelitian ini menggunakan limbah Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) dan Fly Ash sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam pembuatan beton geopolimer. Variasi penggunaan GGBFS adalah sebesar 50% dari berat total semen, sementara Fly Ash digunakan dengan variasi proporsi 5%, 10% dan 15% dari berat total semen. Beton dirancang dengan kuat tekan rencana sebesar 26 MPa. Pengujian dilakukan pada 24 sampel beton berbentuk silinder dengan ukuran 15 x 30 cm. Hasil penelitian menunjukkan rata-rata kuat tekan beton pada umur 28 hari untuk berbagai perbandingan komposisi beton normal yaitu sebesar 34,15 MPa, sedangkan untuk kadar proporsi PCC:GGBFS:Fly Ash sebanyak 45:50:5 mendapat nilai kuat tekan rata-rata sebesar 23,46 MPa, pada campuran 40:50:10 mendapatkan nilai kuat tekan rata-rata yaitu sebesar 18,48 MPa dan pada campuran 35:50:15 menghasilkan kuat tekan rata-rata 19,54 MPa. Berdasarkan hasil analisis, campuran dengan proporsi 50% GGBFS dan 5% Fly Ash merupakan campuran terbaik karena menghasilkan kuat tekan tertinggi di antara semua variasi, yaitu sebesar 23,46 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi tersebut dapat digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen untuk pembuatan beton dengan mempertimbangkan kebutuhan khusus dan potensi penggunaannya.

Kata Kunci: Limbah, Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash.

Abstract
Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash are two industrial by-products with great potential as partial cement substitutes in concrete mixtures. GGBFS is a by-product of the iron smelting process in the steel industry. Once cooled and ground into a fine powder, it exhibits pozzolanic and cementitious properties. Meanwhile, Fly Ash, the residual ash from coal combustion in power plants, also possesses pozzolanic characteristics. The use of GGBFS and Fly Ash not only reduces the reliance on Portland cement but also provides various technical benefits, such as improving the durability of concrete, reducing heat of hydration, and enhancing long-term strength. Additionally, utilizing these materials aligns with the principles of sustainable development by reducing industrial waste and lowering carbon emissions. This study employs Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) and Fly Ash as partial substitutes for cement in the production of geopolymer concrete. The proportion of GGBFS used is 50% of the total cement weight, while Fly Ash is applied in proportions of 5%, 10%, and 15% of the total cement weight. The concrete was designed with a target compressive strength of 26 MPa. Tests were conducted on 24 cylindrical concrete samples measuring 15 x 30 cm. The results revealed that the average compressive strength of concrete at 28 days was 34.15 MPa for normal concrete. For mixtures with a PCC:GGBFS:Fly Ash ratio of 45:50:5, the average compressive strength was 23.46 MPa; for a 40:50:10 ratio, the average strength was 18.48 MPa; and for a 35:50:15 ratio, the average strength was 19.54 MPa. Based on the analysis, the mix with 50% GGBFS and 5% Fly Ash was determined to be the optimal combination, as it achieved the highest compressive strength among all variations, at 23.46 MPa. This demonstrates that this combination can be utilized as a partial cement replacement for concrete production, considering specific requirements and its potential applications.

Keywords: *Ground Granulated Blast Furnace Slag, Fly Ash, Sewage.*

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan material konstruksi yang ramah lingkungan dan berkelanjutan terus meningkat seiring dengan berkembangnya sektor konstruksi dan meningkatnya kesadaran terhadap dampak lingkungan. Produksi semen portland, sebagai bahan pengikat utama dalam beton, memiliki kontribusi signifikan terhadap emisi karbon

dioksida (CO_2), sehingga diperlukan alternatif bahan pengikat yang lebih ramah lingkungan.

Akan tetapi penggunaan material semen yang banyak untuk memenuhi campuran beton dapat mengakibatkan dampak negatif bagi lingkungan, karena saat proses produksi semen akan terjadi emisi CO2 ke udara yang besar dan mengakibatkan pemanasan global serta penipisan lapisan ozon. Dengan adanya dampak negatif dari produksi semen tersebut, maka banyak muncul ide-ide baru untuk menciptakan beton yang lebih ramah lingkungan seperti beton geopolimer (Raafidiani, Sumargo, & Permana, 2020).

Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) dan Fly Ash merupakan dua material hasil samping dari proses industri yang memiliki potensi besar untuk digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton. GGBFS merupakan limbah dari proses peleburan bijih besi di industri baja, yang setelah didinginkan dan digiling menjadi bubuk halus, dapat memberikan sifat pozzolanik dan cementitious. Sementara itu, Fly Ash adalah abu sisa pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang juga memiliki karakteristik pozzolanik.

Penggunaan GGBFS dan Fly Ash tidak hanya mengurangi kebutuhan semen portland, tetapi juga memberikan berbagai keuntungan teknis, seperti meningkatkan durabilitas beton, mengurangi panas hidrasi, dan meningkatkan kekuatan jangka panjang. Di sisi lain, pemanfaatan material ini juga mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan dengan mengurangi limbah industri dan menurunkan emisi karbon.

Namun, aplikasi GGBFS dan Fly Ash dalam campuran beton masih menghadapi tantangan, seperti variabilitas kualitas material, pengaruh terhadap sifat-sifat awal beton, serta pemahaman yang terbatas di kalangan praktisi konstruksi. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengoptimalkan pemanfaatan kedua material ini dalam campuran beton, baik dalam hal proporsi campuran maupun pengaruhnya terhadap sifat mekanis dan durabilitas beton.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pemanfaatan GGBFS dan Fly Ash sebagai bahan substitusi semen dalam beton, guna memberikan kontribusi pada pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

II. LANDASAN TEORI

Beton merupakan sebuah bahan bangunan komposit yang terbuat dari kombinasi agregat dan pengikat (semen). Beton memiliki karakteristik tegangan hancur tekan yang tinggi serta tegangan hancur tarik yang rendah (Gandina & Setiyarto, 2020).

Menurut SNI 2847:2013, beton adalah campuran semen portland atau semen hidrolik yang lain, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil) dan air, dengan atau tanpa bahan tambah atau yang disebut dengan admixture yang akan menjadi benda padat.

Beton yang memiliki kualitas yang baik yaitu beton yang mampu menahan kuat desak yang diberi beban berupa tekanan dengan dipengaruhi oleh bahan-bahan pembentuknya. Beton memiliki kuat tekan yang baik sehingga sering digunakan untuk menjadi jenis struktur bangunan, baik itu bangunan berupa gedung, jembatan ataupun jalan. Beton terdiri dari ±15 % semen, ±8 % air, ±3 % udara, selebihnya pasir dan kerikil. Campuran beton setelah mengeras akan memiliki sifat yang berbeda-beda, tergantung pada cara pembuatannya, perbandingan campuran, cara mencampurkan, cara mencetak, cara memadatkan, dan cara merawatnya yang akan mempengaruhi sifat-sifat beton tersebut (Dirgantara, 2019).

Geopolymer pada awalnya lebih dikenal berdasarkan reaksi kimia, sebagai alkaline activated binders, dengan beberapa terminologi yang sesuai dengan penggunaan material ini seperti low temperature inorganic polymer glasses, alkali bonded ceramic, chemically bounded ceramic, atau alkali activated ash (Tambingon, 2018).

A. Beton Geopolimer

Beton Geopolimer merupakan senyawa silikat alumino anorganik yang disintesiskan dari bahan-bahan produk sampingan seperti abu terbang (fly ash) yang banyak mengandung alumina dan silika. Beton geopolimer adalah beton geosintetik yang reaksi pengikatnya terjadi melalui reaksi polimerisasi dan bukan melalui reaksi hidrasi seperti pada beton konvensional (Sulianti, et al., 2021). Beton geopolimer adalah beton ramah lingkungan yang bahan atau materialnya berupa anorganik. Beton geopolimer memiliki material yang hampir sama dengan beton normal, akan tetapi pada beton geopolimer untuk bahan pengikatnya sering diganti dengan limbah-limbah yang mengalami polimerisasi seperti limbah GGBFS, limbah fly ash dan botom ash yang berasal dari pembakaran pabrik industri. Pada beton geopolimer tidak semua bahan pengikat semen diganti dengan bahan pengikat lainnya, bahan pengikat beton ini bisa dikombinasikan sesuai dengan persentase yang diinginkan.

Beton geopolimer memiliki kelebihan dan kekurangan (Gandina & Setiyarto, 2020), adapun kelebihan dari beton geopolimer sebagai berikut:

1. Mempunyai nilai susut yang kecil
2. Lebih tahan reaksi alkali-silika
3. Tidak menggunakan semen yang dapat mengurangi polusi udara
4. Tahan terhadap api
5. Tahan terhadap serangan asam sulfat
6. Dapat mengurangi polusi udara.

Sedangkan untuk kekurangan beton geopolimer sebagai berikut:

1. Proses pembuatannya lebih rumit daripada beton normal karena jumlah material yang dibutuhkan lebih banyak daripada beton normal.

2. Belum memiliki mix design yang pasti sesuai standar nasional.

B. Limbah *Ground Granulated Balst Furnace Slag* (GGBFS)

GGBFS merupakan limbah hasil pembakaran pada tanur tinggi yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan bangunan yang diperoleh dengan cara penggilingan terak dengan kandungan kimia tertinggi SIO2 (31,47%), CaO (45,47%), Al2O3 (17,19%), (PT. KRNG Indonesia, 2020). GGBFS memiliki sifat cementitious layaknya semen yang dapat berfungsi sebagai bahan perekat agregat. Kandungan SIO_2 dan CaO yang tinggi dapat dijadikan dasaran bahwa GGBFS dapat dijadikan pengganti semen (Hardanu & Sufazen, 2022).

GGBFS digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen karena di dalam GGBFS mengandung kalsium, aluminium dan silika yang memiliki komposisi kimia yang tidak berbeda dengan bahan-bahan mineral alami termasuk bahan hidrasi seperti semen portland. Hidrasi awal dari GGBFS sangat lambat dibanding semen pada suhu pemeliharaan standar 20oC, dengan demikian diperlukan semen atau alkali sebagai aktivator untuk meningkatkan reaksi dari GGBFS tersebut (PT. Krakatau Semen Indonesia, 2023).

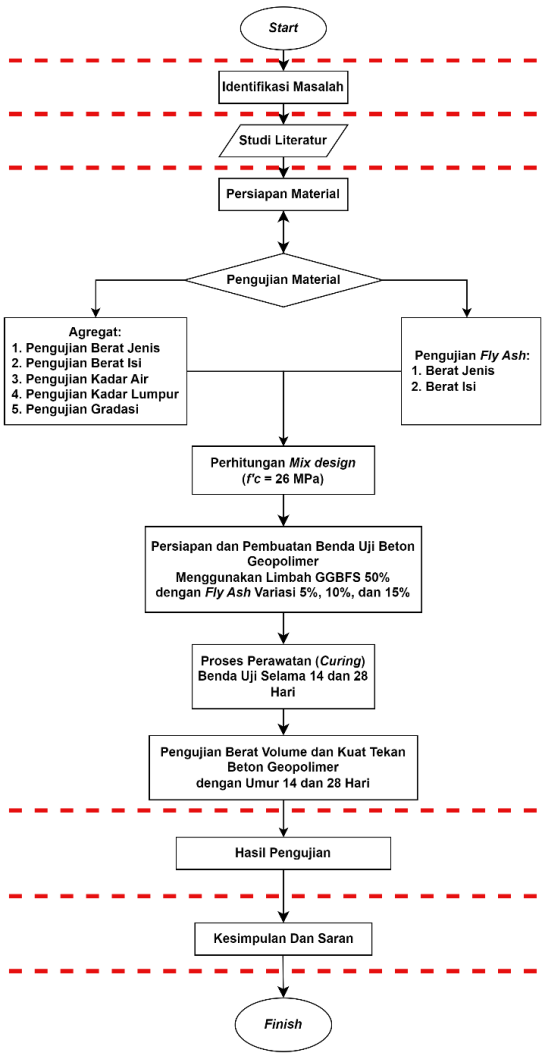
C. Limbah Fly Ash

Fly ash merupakan salah satu jenis pozzolan, di mana pozzolan adalah bahan yang mengandung senyawa silika atau silika alumina yang tidak mempunyai sifat mengikat seperti semen, akan tetapi dalam bentuknya yang halus dan dengan adanya air, maka senyawa-senyawa tersebut akan bereaksi dengan kalsium hidroksida pada suhu normal dan membentuk senyawa kalsium silikat hidrat yang bersifat hidrolis dan mempunyai angka kelarutan yang cukup rendah (Putra, 2022).

Fly ash adalah bagian dari sisa pembakaran batu bara yang berbentuk partikel halus amorf. Proses pembakaran batu bara pada unit pembangkit uap (boiler) akan membentuk dua jenis abu, yaitu abu terbang (fly ash) dan abu dasar (bottom ash). Komposisi abu batu bara terdiri dari 10 – 20% abu dasar 80 – 90% berupa abu terbang. Fly ash ditangkap dengan electric precipitator sebelum dibuang ke udara melalui cerobong (Setiawati, 2018).

III. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah metode eksperimental, metode yang dilakukan dengan cara percobaan secara langsung untuk mendapatkan hasil yang menghubungkan antara variabel yang digunakan. Diagram alir penelitian dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

A. Pengujian Material

Pengujian material dilakukan untuk membuktikan bahwa material pada beton instan memiliki standar yang sesuai dengan SNI dalam pembuatan beton.

B. *Mix Design*

Tahap perencanaan campuran atau sering disebut dengan *mix design* pada penelitian ini dilakukan dengan metode yang sesuai dengan SNI 7394-2008. Pada penelitian ini menggunakan beton instan dengan merek BEPmix dari PT. Beton Elemindo Perkasa dengan mutu beton 26 MPa atau K-300. BEPmix adalah beton instan yang terdiri dari campuran bahan-bahan berkualitas tinggi, beton ini tersusun dari semen, pasir, agregat dan juga admixture. Adapun spesifikasi BEPmix ini sebagai berikut:

Tabel 1. Spesifikasi BEPmix

Kemasan	50 Kg per zak
Kebutuhan Air	4-5 liter per zak
Slump	12 ± 2 cm
Volume per zak	± 0,023 m^3

Keutuhan per m³	43 zak per m³

(Sumber: PT. Beton Elemindo Peskasa, BEPmix)

C. Pembuatan Benda Uji

Pada hasil studi literatur, komposisi campuran substitusi GGBFS dan Fly Ash pada campuran beton yang digunakan yaitu dengan variasi campuran sebagai berikut:

Tabel 2. Tabel Komposisi Campuran GGBFS dan Fly Ash

No.	Kode Benda Uji	Kadar GGBFS (%)	Kadar Fly Ash (%)	Jumlah Hari	
				14	28
1	BN	0	0	3	3
2	BGF-1	50	5	3	3
3	BGF-2	50	10	3	3
4	BGF-3	50	15	3	3
Jumlah				12	12
Jumlah Total Keseluruhan Benda Uji				**24**	

Dari variabel penelitian yang ditentukan dalam penelitian ini jumlah sampel yang diperlukan untuk pengujian kuat tekan dengan umur 14 dan 28 terdiri dari 24 sampel, di mana dari 24 sampel terbagi menjadi 2 kali pengujian yaitu pengujian hari ke-14 terdiri dari 12 sampel dan hari ke-28 terdiri dari 12 sampel dengan persentase limbah yang berbeda-beda.

Pada penelitian ini benda uji dibuat menggunakan alat cetak sekali pakai yaitu pipa PVC dengan ukuran 6 inci sebagai pengganti silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang digunakan dalam uji kuat tekan.

D. Perawatan Benda Uji

Setelah pembuatan benda uji selesai, tahap selanjutnya dilakukan curing atau perawatan benda uji beton sebelum di uji tekan. Pada tahap perawatan benda uji atau beton sesuai dengan SNI 2493-2011, untuk perawatan benda uji yaitu dengan cara benda uji direndam keseluruhan di dalam bak air yang mempunyai suhu 23±1,7ºC mulai dari pelepasan benda uji dari cetakan hingga saat pengujian dilakukan yaitu pada umur 14 dan 28 hari. Hal ini dilakukan untuk menjamin proses hidrasi beton dapat berlangsung dengan baik dan proses pengerasannya juga terjadi dengan sempurna sehingga tidak terjadi retak-retak pada beton dan mutu betonnya dapat terjamin. Adapun proses perendaman benda uji ini dilakukan di Laboratorium Konstruksi Bangunan Politeknik TEDC Bandung.

E. Pengujian

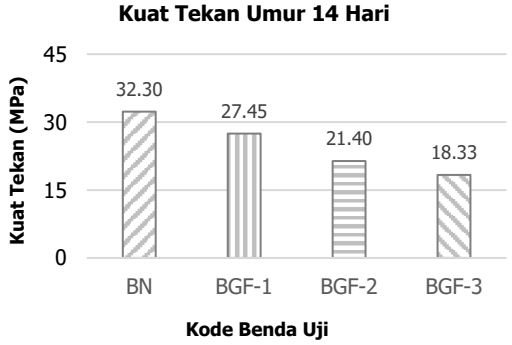
Setelah dilakukan perawatan maka dapat dilakukan pengujian kuat tekan sesuai dengan umur beton yang direncanakan yaitu pada hari ke-14 dan hari ke-28 dengan menggunakan mesin uji kuat tekan *(Compression Strength Machine).*

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat tekan beton merupakan besarnya tekanan per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton mengalami kehancuran ketika diberikan gaya tekan tertentu yang dihasilkan oleh mesin uji. Pada penelitian ini dilakukan 2 kali pengujian kuat tekan yaitu pada hari ke-14 dan hari ke-28. Nilai kuat tekan beton umur 14 hari dilakukan pengujian di Universitas Pendidikan Indonesia (UPI) Bandung didapatkan hasil setelah melakukan pengujian dengan masing-masing proporsinya dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 3. Hasil Pengujian Kuat Tekan Hari Ke-14

No.	Kode Benda Uji		Berat Benda Uji (Kg)	Kuat Tekan Beton (f'c) (MPa)	Kuat Tekan Beton Rata-rata (Σf'cr) (MPa)
1	BN	A	13,667	32,238	32,30
		B	13,523	30,575	
		C	13,634	32,369	
2	BGF-1	A	13,676	26,744	27,45
		B	13,718	27,021	
		C	13,906	27,887	
3	BGF-2	A	13,764	21,753	21,40
		B	13,779	21,045	
		C	13,562	20,112	
4	BGF-3	A	13,532	18,606	18,33
		B	13,529	18,052	
		C	13,552	20,751	



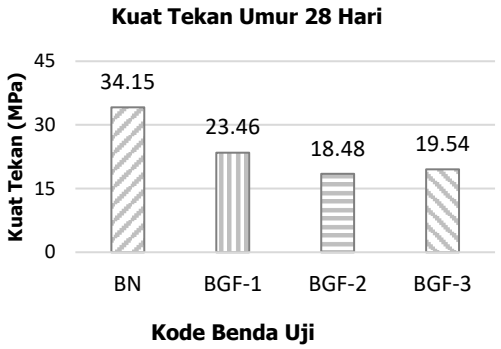
Gambar 2. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Hari ke-14

Berdasarkan **Tabel 3** dan **Gambar 2**, nilai kuat tekan pada umur 14 hari didapatkan nilai kuat tekan rata-rata tertinggi yaitu pada beton normal (BN) sebesar 32,30 MPa, sedangkan untuk beton dengan campuran Semen, GGBFS dan Fly Ash dengan persentase 45/50/5 (BGF-1), 40/50/10 (BGF-2) dan 35/50/15 (BGF-3) didapatkan kuat tekan beton sebesar 27,45 MPa, 21,40 MPa dan 18,33 MPa. Dari hasil tersebut maka beton dengan persentase campuran Semen, GGBFS dan Fly Ash 45/50/5 (BGF-1) menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dari kuat tekan rencana yaitu sebesar 27,45 MPa.

Adapun hasil uji tekan pada hari ke-28 didapatkan hasil sebagai berikut:

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Hari Ke-28

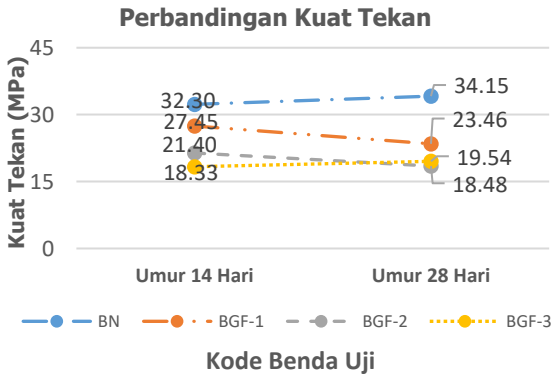
No.	Kode Benda Uji		Berat Benda Uji (Kg)	Kuat Tekan Beton (f'c) (MPa)	Kuat Tekan Beton Rata-rata (Σf'cr) (MPa)
1	BN	A	13,263	32,289	34,15
		B	13,069	36,002	
		C	13,149	25,555	
2	BGF-1	A	13,624	23,846	23,46
		B	13,542	26,166	
		C	13,827	23,065	
3	BGF-2	A	13,422	21,040	18,48
		B	13,538	18,561	
		C	13,594	18,403	
4	BGF-3	A	13,616	18,753	19,54
		B	13,626	19,568	
		C	13,359	19,506	



Gambar 3. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Hari ke-28.

Berdasarkan **Tabel 4** dan **Gambar 3** nilai kuat tekan pada umur 28 hari di atas didapatkan nilai kuat tekan tertinggi yaitu pada beton normal (BN) sebesar 34,15 MPa, Sedangkan untuk beton dengan campuran Semen, GGBFS dan Fly Ash dengan persentase 45/50/5 (BGF-1), 40/50/10 (BGF-2) dan 35/50/15 (BGF-3) didapatkan kuat tekan beton sebesar 23,46 MPa, 18,48 MPa dan 19,54 MPa. Dari hasil tersebut maka beton dengan persentase campuran Semen, GGBFS dan Fly Ash 45/50/5 (BGF-1) hampir menghasilkan kuat tekan rencana yaitu sebesar 23,46 MPa.

Berdasarkan hasil analisis, dapat diketahui bahwa kuat tekan rata-rata tertinggi diperoleh pada beton normal pada usia 14 hari maupun 28 hari. Sementara itu, kuat tekan beton tertinggi dengan pemanfaatan limbah GGBFS dan fly ash sebagai pengganti sebagian semen terdapat pada variasi BGF-1, yang terdiri dari 45% semen, 50% GGBFS, dan 5% fly ash. Pada variasi ini, kuat tekan rata-rata mencapai 27,45 MPa pada usia 14 hari dan 23,46 MPa pada usia 28 hari. Adapun perbandingan kenaikan dan penurunan kuat tekan beton pada usia 14 dan 28 hari dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 4. Grafik Perbandingan Kuat Tekan Beton pada hari ke-14 dan hari ke-28.

Pada **Gambar 4** dapat dilihat jika nilai kuat tekan beton normal umur 14 hari dan 28 hari mengalami kenaikan sebesar 5% sedangkan untuk beton dengan campuran limbah mengalami penurunan yaitu pada beton dengan campuran Semen 45%, GGBFS 50% dan fly ash 5% (BGF-1) umur 14 ke 28 hari mengalami penurunan sebesar 17% dan beton dengan campuran Semen 40%, GGBFS 50% dan fly ash 10% (BGF-2) mengalami penurunan 16% sedangkan beton dengan campuran Semen 35%, GGBFS 50% dan fly ash 15% (BGF-3) mengalami kenaikan sebesar 6%.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai kuat tekan rata-rata beton dari pemanfaatan limbah GGBFS dan Fly Ash sebagai bahan pengganti sebagian semen dengan variasi persentase GGBFS 50% dan Fly Ash sebesar 5%, 10% dan 15% dengan kuat tekan rencana 26 MPa didapatkan hasil sebagai berikut:
   a. Untuk umur 14 hari dengan variasi Semen, GGBFS dan Fly Ash yaitu: BN (100%/0%/0%) 31,73 MPa, BGF-1 (45%/50%/5%) 27,22 MPa, BGF-2 (40%/50%/10%) 20,97 MPa dan BGF-3 (35%/50%/15%) 19,14 MPa.
   b. Untuk umur 28 hari dengan variasi Semen, GGBFS dan Fly Ash yaitu: BN (100%/0%/0%) 31,28 MPa, BGF-1 (45%/50%/5%) 24,36 MPa, BGF-2 (40%/50%/10%) 19,33 MPa dan BGF-3 (35%/50%/15%) 19,28 MPa.

   Hasil yang didapat pada nilai kuat tekan umur 28 hari mengalami penurunan dari nilai kuat tekan umur 14 hari, hal ini disebabkan oleh unsur senyawa K_2O dan Na_2O tidak terdapat pada GGBFS dan Fly Ash. Sedangkan senyawa SiO pada GGBFS dan Fly Ash lebih tinggi dibandingkan Semen menyebabkan waktu pengikatan beton yang dibutuhkan lebih lama. Selain itu unsur senyawa MgO tidak terdapat

pada Fly Ash dan unsur senyawa MgO GGBFS kurang dari MgO semen sehingga menyebabkan terjadinya penurunan nilai kuat tekan beton.

2. Nilai kuat tekan maksimum beton yang didapat yaitu pada beton normal dengan kuat tekan 31,73 MPa pada umur rencana 14 hari, di mana nilai yang didapat melebihi nilai kuat tekan rencana yaitu sebesar 26 MPa. Sedangkan nilai kuat tekan maksimum beton untuk variasi GGBFS dan Fly Ash didapatkan pada persentase Semen 45%, GGBFS 50% dan Fly Ash 5% yaitu 27,22 MPa pada umur rencana 14 hari, nilai yang didapat juga lebih besar dari nilai kuat tekan rencana yaitu 26 MPa.
3. Dari hasil analisis nilai kuat tekan beton rata-rata dengan pemanfaatan limbah GGBFS dan limbah Fly Ash sebagai bahan pengganti sebagian semen masih bisa digunakan sebagai bahan pembuatan beton yang bermutu sedang atau rendah. Penggunaan limbah ini juga dapat disebut sebagai beton ramah lingkungan karena dapat mengurangi limbah hasil industri dan juga mengurangi penggunaan semen yang memiliki dampak tidak baik untuk lingkungan.

B. Saran

Dari penelitian yang dilakukan, penulis memberikan beberapa saran untuk penelitian selanjutnya:

1. Sebaiknya dilakukan pengujian dengan umur rencana 7, 14, 21 dan 28 hari agar nilai dapat nilai peningkatan kuat tekan yang terjadi.
2. Saat melakukan penelitian selanjutnya disarankan saat melakukan proses *curing* atau perawatan beton sebaiknya dipantau setiap hari agar terhindar dari kesalahan yang mengakibatkan nilai kuat tekan beton dapat berkurang.
3. Dibutuhkannya penelitian lebih lanjut tentang penggunaan limbah GGBFS dan *Fly Ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen dengan variasi persentase yang lebih bervariasi.
4. Dalam penelitian selanjutnya diharapkan persentase semen maksimal 45% agar bisa mencapai mutu beton yang direncanakan dan persentase yang diubah yaitu persentase GGBFS dan *Fly Ash* saja.
5. Diharapkan penelitian selanjutnya melakukan peninjauan ulang pengujian kuat tekan beton di atas umur 28 hari.

DAFTAR PUSTAKA

Arini, R.N., Warastuti, N. & Darmawan, M.K. (2019) "*Analisis Kuat Tekan Dengan Aplikasi Ground Granulated Blast Furnace Slag Sebagai Pengganti Sebagian Semen Pada Campuran Beton"*, Jurnal Konstruksi.

Dirgantara, M.B. (2019) *Analisis Kuat Tekan Beton Menggunakan Ground Granulated Ballast Furnace Slag Sebagai Pengganti Parsial Semen Dengan Tambahan Zat Aditif*. Makassar: Universitas Bosowa.

Gandina, N.L. & Setiyarto, Y. (2020) '*Studi Eksperimental Beton Geopolimer Dengan Memanfaatkan Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen dan Serat Mati Sebagai Bahan Aditif'*, Civil Engineering Research Journal, 27. Available at: https://ojs.unikom.ac.id/index.php/crane (Accessed: [date]).

Irianta, F.G. (2010) *'Kualitas Beton Dengan Memanfaatkan Bottom Ash Limbah Bahan Bakar Batu Bara Pada Industri'*, Jurnal Teknik Sipil & Perencanaan.

Irlan, A.O., Kurniawati, G. & Sofyan, M. (2020) '*Tinjauan Karakteristik Bahan Penyusun Beton Berpori Dengan Menggunakan Fly Ash dan Superplastizer Untuk Perkerasan Jalan Ramah Lingkungan'*, Departemen Teknik Sipil, Universitas Trisakti.

Lubis, E., Antonio & Hardjito, D. (2015) '*Komposisi Campuran Optimum Bottom Ash dan Fly Ash Sebagai Agregat Buatan*', Dimensi Utama Teknik Sipil, pp. 16–23.

Manuahe, R., Sumajouw, M.D.J. & Windah, R.S. (2014) '*Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash)'*, Jurnal Sipil Statik, pp. 277–282.

Priambodoo, A.H. & Susilowati, A. (2019) '*Karakteristik Beton Dengan Campuran Fly Ash dan GGBFS (Ground Granulated Blast Furnace Slag)*', Seminar Nasional Teknik Sipil Politeknik Negeri Jakarta, pp. 746–750.

PT Krakatau Semen Indonesia (2023) 'PT Krakatau Semen Indonesia Mengolah Granulated Blast Furnace Slag Menjadi Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS)', Metalextra.

Raafidiani, R., Sumargo, S. & Permana, R. (2020) *The Influence of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) As Portland Composite Cement (PCC) Substitution In Improving Compressive Strength Of Concrete,* IOP Publishing.

Salain, I.A., Wiryasa, M.N. & Pamungkas, I.M. (2020).*Kuat Tekan Beton Geopolimer Menggunakan Abu Terbang*, Jurnal Spektran, pp. 105–114.

Setiawati, M. (2018) *'Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton'*, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Jakarta, p. 2.

SNI 03-2834 (2000) Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.

SNI 03-2847 (2002) *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*.

SNI 2493 (2011) *Tata Cara Pembuatan Dan Perawatan Benda Uji Beton di Laboratorium*.

Yasin, A.K. (2017) *Rekayasa Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.