

Proporsi *Mix design* Beton Berat *Geopolymer* Menggunakan *Fly ash* Kelas C dan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS)

I.A. Wulandary¹, Iman Satyarno^{1*}, Djoko Sulisty¹, Agus Budhie Wijatna²

¹Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

²Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: imansatyarno@ugm.ac.id

INTISARI

Peningkatan kebutuhan infrastruktur menyebabkan permintaan penggunaan semen meningkat, yang dapat berkontribusi pada peningkatan emisi gas CO₂. Oleh karena itu diperlukan penggunaan material alternatif seperti *fly ash* kelas C dan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) untuk mengurangi penggunaan semen, sehingga berpotensi menyebabkan penurunan dampak emisi gas CO₂ terhadap lingkungan. Material tersebut selain dapat mengurangi efek emisi gas CO₂ juga dapat menghasilkan struktur mikro yang lebih padat dan dapat mengurangi porositas, sehingga baik dalam merancang proporsi *mix design* beton berat *geopolymer*. Penelitian ini menyelidiki pengaruh rasio antara volume absolut pasta terhadap volume absolut rongga agregat halus (R_m) sebesar 1,0 ; 1,5 ; 1,75 ; 2,0 dan pengaruh rasio antara volume absolut mortar terhadap volume absolut rongga agregat kasar (R_b) sebesar 1,25 ; 1,37 ; 1,5 pada karakteristik fisik yaitu *workability* dan berat jenis beton, serta karakteristik mekanik yaitu kuat tekan beton agar didapatkan proporsi yang baik secara fisik dan mekanik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai R_m 1,75 dan R_b 1,37 menunjukkan *workability* yang baik dan menghasilkan berat jenis sebesar 5102,87 kg/m³, serta kuat tekan sebesar 63,40 MPa.

Kata kunci: Beton Berat *Geopolymer*, *fly ash*, GGBFS, Potongan Baja Tulangan, Pasir Besi.

1 PENDAHULUAN

Emisi gas CO₂ dalam produksi semen merupakan kontributor signifikan terhadap emisi gas rumah kaca, dimana produksi semen menyumbang 5-8% dari emisi tersebut (Shobeiri *et al.*, 2021). Untuk mengurangi emisi gas CO₂ diperlukan material alternatif seperti *fly ash* sebagai salah satu jenis limbah pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan batu bara sebagai bahan bakar (Cornelis *et al.*, 2022), limbah tersebut dimanfaatkan sebagai konsep *sustainable* material, dengan menggunakan *fly ash* dalam proses polimerisasi mortar *geopolymer* untuk menggantikan semen *portland* pada pencampuran adukan beton (Widiana, 2022). *Ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) merupakan bahan yang berbentuk butiran dan diperoleh dari pengolahan terak (*slag*) yang dihasilkan selama proses pembuatan besi dan baja industri (Matsimbe *et al.*, 2022). Pemanfaatan dengan optimal produk industri *high calcium* seperti *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS), *fly ash* Kelas-C, dan *phosphogypsum* dalam sistem *geopolymer unary* atau *biner* menghasilkan gel C-S-H atau C-A-SH dengan jaringan *geopolymerization* padat yang dapat meningkatkan kekuatan dan waktu pengerasan (Matsimbe *et al.*, 2022). Keunggulan dari material tersebut yaitu menghasilkan struktur mikro yang padat dan dapat mengurangi porositas (Sasui *et al.*, 2020), sehingga dapat menghasilkan beton yang memiliki permeabilitas rendah. Dengan permeabilitas yang rendah beton ini dapat dimanfaatkan dalam bidang kedokteran sebagai perisai radiasi sinar gamma dengan menggunakan material berdensitas tinggi (Öz *et al.*, 2022). Perancangan beton berat *geopolymer* diperlukan material yang memiliki densitas tinggi untuk mencapai berat jenis beton dengan menggunakan agregat alami berupa magnetit, barit, limonit, dan pasir besi, atau dapat menggunakan agregat buatan seperti potongan baja ASTM C637-98a. Berdasarkan penelitian Naresh *et al.*, (2019) penggunaan agregat *steel punches* dapat meningkatkan densitas beton. Hal ini dapat menjadi pilihan yang baik dalam pembuatan *mix design* beton berat *geopolymer*. Penggunaan agregat dengan densitas tinggi dapat secara signifikan meningkatkan densitas beton dan meningkatkan sifat pelindung radiasinya (Seoudi *et al.*, 2019). Pada penelitian ini digunakan agregat kasar berupa potongan baja tulangan berukuran 10 mm dan berdiameter 10 mm.

Berdasarkan penelitian Cornelis *et al.*, (2018) dan Malkawi *et al.*, (2016) faktor-faktor yang dapat mempengaruhi pembuatan beton *geopolymer* melibatkan penggunaan konsentrasi NaOH dan larutan aktivator $Na_2SiO_3/NaOH$ yang mempengaruhi sifat *workability* dan *setting time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan konsentrasi NaOH yang tinggi dapat mempengaruhi *workability* dan *setting time* sedangkan pada $Na_2SiO_3/NaOH$ yang tinggi dapat menurunkan kuat tekan. Penelitian Antoni *et al.*, (2020) menunjukkan dengan adanya penambahan *borax* didalam

matrix high calcium fly ash geopolymer dapat menunda waktu *setting time*, namun dengan penggunaan *borax* hingga 20% pada *high calcium geopolymer* dapat menurunkan kuat tekan mortar hingga 30% dari *high calcium fly ash geopolymer* tanpa *borax*. Berdasarkan penelitian Teo *et al.*, (2022) hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio *FA/GGBFS* 50:50 dapat menghasilkan kuat tekan dan *setting time* yang optimum serta menunjukkan *flowability* yang baik. Selain itu, Cornelis *et al.*, (2019) menyatakan peningkatan rasio mortar (R_m) dan rasio alkaline/binder (A) yang lebih tinggi dapat menghasilkan *flow* yang lebih cair dan memudahkan proses pengerjaan.

Berdasarkan literatur diatas, maka penelitian ini menggunakan agregat kasar berupa potongan baja tulangan diameter 10 mm dan panjang 10 mm, agregat halus berupa pasir besi yang berasal dari Kulon Progo. Material pembuatan *geopolymer* menggunakan *fly ash* kelas C yang berasal dari PLTU Paiton dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) berasal dari PT. Krakatau Semen Indonesia dengan perbandingan *FA/FGGBFS* 50:50. Perawatan benda uji dilakukan pada *ambient curing*.

2 METODELOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimental, dimana dilakukan percobaan langsung untuk memperoleh data atau hasil yang menghubungkan variabel bebas, seperti rasio mortar (R_m) dan rasio beton (R_b) dengan variabel terikat yaitu rasio $A = \text{alkaline}/(\text{FA} + \text{GGBFS}) = 0,45$ dimana rasio *FA/GGBFS* 50:50 yang akan diteliti. Lokasi penelitian dilakukan di Laboratorium Bahan Bangunan Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Universitas Gadjah Mada pada pengujian *flowability* mortar, berat jenis beton dan kuat tekan beton. Dikarenakan belum ada standar khusus untuk perancangan *mix design* beton berat *geopolymer*, maka penelitian ini dilakukan berdasarkan penelitian Satyarno *et al.*, (2014) dengan menggunakan metode perhitungan *volume absolute method*.

2.1 Bahan-Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian berupa *fly ash* kelas C yang berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton yang berasal dari Malang yang terdiri dari komposisi kimia berikut Al_2O_3 23,8%, SiO_2 48,7%, CaO 12,7% dan Fe_2O_3 11,0% dianalisis menggunakan XRF atau *X-Ray Fluorescence*. Berdasarkan ASTM C618 *fly ash* diklasifikasikan sebagai kelas C karena memiliki kumulatif Al_2O_3 , SiO_2 dan $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$. *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) yang digunakan berasal dari PT. Krakatau Semen Indonesia. Berdasarkan ACI 304.3R-96 dalam pembuatan beton berat diperlukan agregat yang memiliki densitas tinggi, sehingga pada penelitian ini digunakan agregat berupa potongan baja tulangan diameter 10 mm dan panjang 10 mm. Agregat halus yang digunakan pada beton berat *geopolymer* berupa pasir besi yang berasal dari Kulon Progo, Yogyakarta. Pasir besi digunakan karena memiliki berat jenis yang tinggi. Menurut Alhadi (2006) dalam Tim Survei Jurusan Teknik Geologi UGM 1998; dalam Alwi (1999) pasir besi memiliki kandungan unsur besi (Fe) dalam molekul Fe_2O_3 dan FeO yang masing-masing sebesar 56,090% dan 14,930%. Aktivator yang digunakan pada penelitian beton berat *geopolymer* yaitu larutan sodium hidroksida (NaOH) yang berbentuk *flakes* dan larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) yang berbentuk gel. Bahan tambah yang digunakan sebagai *retarder* dalam campuran adalah *borax*.

2.2 Persiapan, Pengadukan dan Perawatan

Pencampuran diawali dengan mempersiapkan aktivator yang akan digunakan berupa larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) dan larutan sodium hidroksida (NaOH) (Cornelis *et al.*, 2019), dilanjutkan dengan pencampuran *borax* 3% berdasarkan persentase *FA/GGBFS* (Antoni *et al.*, 2020). Pada penelitian ini menggunakan molaritas 10 M berdasarkan hasil dari penelitian Cornelis *et al.*, (2018) untuk perbandingan antara sodium silikat (Na_2SiO_3) dan larutan sodium hidroksida (NaOH) yaitu 1,5. Pengadukan dilakukan dengan cara konvensional menggunakan *mixer* berkapasitas 0,2 m³. Proses pengadukan dilakukan dengan mencampurkan *fly ash* kelas C, GGBFS dan agregat halus hingga merata, selanjutnya campurkan larutan aktivator diaduk ± 3 menit, setelah adukan tercampur rata masukkan agregat kasar diaduk ± 4 menit sampai menjadi homogen. Pembuatan benda uji *flow* mortar dengan alat *mixer* berkapasitas 0,02 m³. Pengujian *flow* mortar menggunakan alat uji *flow table* berdasarkan ASTM C230. Proporsi campuran yang ditetapkan untuk membuat benda uji kuat tekan berdasarkan hasil pengujian *flow* mortar yang menunjukkan campuran dengan *workability* paling baik. Benda uji kuat tekan dilakukan perawatan pada suhu ruangan selama 28 hari dan dilakukan pengujian kuat tekan pada umur 1 dan 28 hari. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai standar ASTM C39.

2.3 Mix design Beton Berat Geopolymer

Adapun *mix design* beton berat *geopolymer* dilakukan untuk menyelidiki sifat fisik berupa *flowability* mortar, berat jenis beton serta sifat mekanik berupa kuat tekan beton. Perhitungan proporsi *mix design* dengan menggunakan *volume absolute method* (Satyarno *et al.*, 2014).

2.3.1 Proporsi Mix design pasta Geopolymer

Pada perhitungan perancangan campuran pasta *geopolymer*, dapat dihitung dalam persamaan (1) berdasarkan penelitian Satyarno *et al.*, (2014) untuk perhitungan penyusun material pasta dalam 1 m³. Dimana konsentrasi NaOH ditetapkan 10 M, rasio berat *SS/SH* ditetapkan $R=1,5$ berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Cornelis *et al.*, (2018). Pada rasio *alkaline/(FA+GGBFS)* $A=0,45$ berdasarkan penelitian Widiana, (2022). Berdasarkan Teo *et al.*, (2022) pada penelitian ini menggunakan persentase rasio $W_{fa} : W_{GGBFS}$ yaitu (50:50).

$$\frac{W_{fa}}{G_{S_{fa}}\gamma_w} + \frac{W_{ggbfs}}{G_{S_{ggbfs}}\gamma_w} + \frac{W_{ss}}{G_{S_{ss}}\gamma_w} + \frac{W_{sh}}{G_{S_{sh}}\gamma_w} = 1m^3 \tag{1}$$

2.3.2 Proporsi Mix design Mortar Geopolymer

Perancangan campuran mortar *geopolymer* digunakan rasio *SS/SH* ditetapkan $R=1,5$. Pada rasio *alkaline/(FA+GGBFS)* $A=0,45$, dilanjutkan dengan menghitung volume rongga agregat halus ($V_{r_{agh}}$) menggunakan rumus Persamaan (2) berdasarkan penelitian Satyarno *et al.*, (2014) sebagai berikut:

$$V_{r_{agh}} = 1 - \frac{B_{s_{agh}}}{G_{s_{agh}}\gamma_w} \tag{2}$$

Pada rasio volume absolut pasta *geopolymer* terhadap volume rongga agregat halus (R_m) digunakan berbagai variasi rasio yaitu 1,0 ; 1,5 ; 1,75 ; 2,0 karena pada perancangan beton berat *geopolymer* membutuhkan *flow* yang baik dalam pengadukan. Selanjutnya, untuk mendapatkan nilai berat *fly ash*, GGBFS, NaOH dan Na₂SiO₃ dalam 1 m³ campuran mortar menggunakan rumus Persamaan (3) (Satyarno *et al.*, 2014) dan untuk mendapatkan agregat halus dalam 1 m³ pada campuran mortar menggunakan rumus Persamaan (4) berdasarkan penelitian Satyarno *et al.*, (2014). Proporsi *mix design* mortar *geopolymer* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

$$\frac{W_{fa}}{G_{S_{fa}}\gamma_w} + \frac{B.W_{fa}}{G_{S_{ggbfs}}\gamma_w} + \frac{W_{ss}}{G_{S_{ss}}\gamma_w} + \frac{W_{sh}}{G_{S_{sh}}\gamma_w} = V_{r_{agh}} \tag{3}$$

$$R_m V_{r_{agh}} + \frac{W_{agh}}{G_{s_{agh}}\gamma_w} = 1m^3 \tag{4}$$

Tabel 2.1 Proporsi Mix Design Mortar Geopolymer

	Rasio Molar	Rasio Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Rasio Vol.Pasta/Vol. Rongga Pasir	Rasio Berat FA/GGBFS	Alkaline/Binder	Borax
	(M)	(R)	(RM)	(B)	(A)	(Wborax)
Mix 1	10	1,5	1,00	50:50	0,45	3%
Mix 2	10	1,5	1,50	50:50	0,45	3%
Mix 3	10	1,5	1,75	50:50	0,45	3%
Mix 4	10	1,5	2,00	50:50	0,45	3%

2.3.3 Proporsi Mix design Beton Berat Geopolymer

Perancangan campuran beton berat *geopolymer* dapat dilihat pada Tabel 2.2 data yang digunakan berupa konsentrasi NaOH ditetapkan 10 M, rasio berat *SS/SH* ditetapkan $R=1,5$. Pada rasio *alkaline/(FA+GGBFS)* $A=0,45$, dilanjutkan menghitung volume rongga agregat kasar ($V_{r_{agk}}$) menggunakan rumus Persamaan (5) (Satyarno *et al.*, 2014). Pada rasio volume absolut pasta *geopolymer* terhadap volume rongga agregat halus (R_m) digunakan 1,75 dan rasio volume absolut mortar *geopolymer* terhadap volume rongga agregat kasar (R_b) digunakan beberapa variasi rasio yaitu 1,25 ; 1,37 ; 1,5 selanjutnya, untuk mendapatkan nilai berat *fly ash*, GGBFS, NaOH dan Na₂SiO₃ dalam 1 m³ campuran beton berat *geopolymer* menggunakan rumus Persamaan (6) (Satyarno *et al.*, 2014), untuk mendapatkan agregat halus dalam 1 m³ pada campuran beton berat *geopolymer* menggunakan rumus Persamaan (7) (Satyarno *et al.*, 2014) dan untuk mendapatkan agregat kasar dalam 1 m³ pada campuran beton berat *geopolymer* menggunakan rumus Persamaan (8) berdasarkan penelitian Satyarno *et al.*, (2014).

Tabel 2.2 Proporsi *Mix Design* Beton Berat *Geopolymer*.

	Rasio Molar	Rasio Na ₂ SiO ₃ /Na Oh	Rasio Vol.Pasta/Vol. Rongga Pasir	Rasio Vol.Mortar/Vol. Rongga Kasar	Rasio Berat FA/GGBFS	Alkaline/Binder	Borax
	(M)	(R)	(RM)	(RB)	(B)	(A)	(Wborax)
Mix 1	10	1,5	1,75	1,25	50:50	0,45	3%
Mix 2	10	1,5	1,75	1,37	50:50	0,45	3%
Mix 3	10	1,5	1,75	1,50	50:50	0,45	3%

$$Vr_{agk} = 1 - \frac{Bs_{agk}}{Gs_{agk} \gamma_w} \tag{5}$$

$$\frac{W_{fa}}{Gs_{fa} \gamma_w} + \frac{B.W_{fa}}{Gs_{ggbf} \gamma_w} + \frac{W_{ss}}{Gs_{ss} \gamma_w} + \frac{W_{sh}}{Gs_{sh} \gamma_w} = R_m Vr_{agh} R_b Vr_{agk} \tag{6}$$

$$R_m Vr_{agh} R_b Vr_{agk} + \frac{W_{agh}}{Gs_{agh} \gamma_w} = R_b Vr_{agk} \tag{7}$$

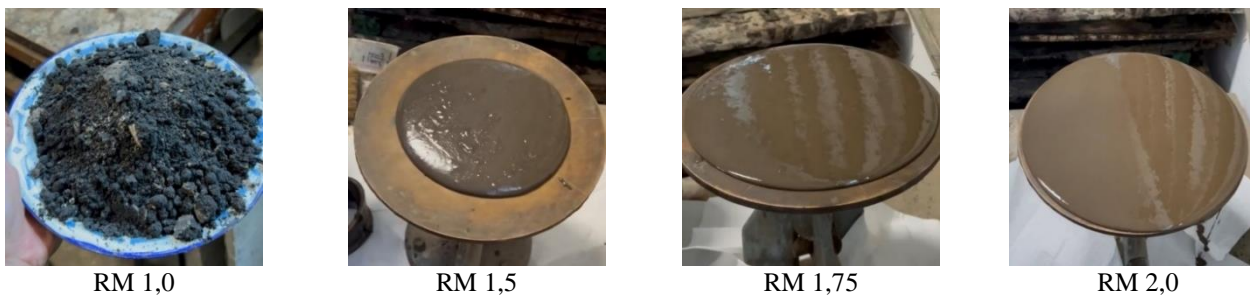
$$R_b Vr_{agk} + \frac{W_{agk}}{Gs_{agk} \gamma_w} = 1 m^3 \tag{8}$$

3 HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian *flowability* mortar, berat jenis dan kuat tekan beton berat *geopolymer* di jelaskan pada poin berikut ini.

3.1 *Flowability* Mortar *Geopolymer*

Hasil pengujian *flow* mortar dapat dilihat pada Gambar 3.1 yang menunjukkan bahwa dengan nilai R_m 1,0, campuran tidak dapat mengalir dan memiliki *workability* yang sangat rendah. Hal ini disebabkan oleh nilai R_m yang rendah, mengindikasikan bahwa volume absolut pasta lebih sedikit dibandingkan dengan volume absolut agregat halus. Hasil pengujian menunjukkan bahwa, semakin baik *workability* semakin tinggi nilai R_m yang digunakan pada campuran. Hasil pengujian ini linier dengan penelitian Cornelis *et al.*, (2019) yang menyatakan bahwa peningkatan rasio mortar (R_m) dan rasio *alkaline/binder* (A) dapat menghasilkan *workability* yang lebih baik dan memudahkan proses pengerjaan. Pada nilai R_m 1,5 menunjukkan konsistensi *flow* mortar yang terlalu kental, sehingga sulit dalam pengadukan, sedangkan nilai R_m 1,75 memiliki konsistensi yang baik dimana konsistensi yang dimiliki tidak terlalu kental seperti nilai R_m 1,5 dan tidak terlalu cair seperti nilai R_m 2,0. Pada nilai R_m 2,0 memiliki konsistensi *flow* mortar yang terlalu cair, sehingga tidak cocok dalam pembuatan beton berat *geopolymer* karena akan menyebabkan agregat kasar mengalami segregasi. Berdasarkan pengujian *flowability* mortar yang dilakukan, maka untuk melakukan perancangan beton berat *geopolymer* ditetapkan nilai R_m 1,75.



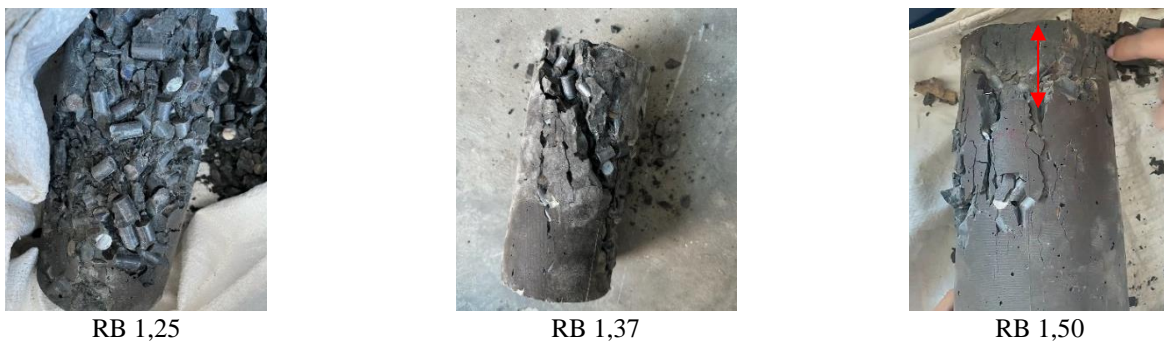
Gambar 3.1. Hasil Pengujian *Flowability* Mortar *Geopolymer*

3.2 Berat Jenis dan Kuat Tekan Beton Berat *Geopolymer*

Pembuatan benda uji untuk proporsi *mix design* beton berat *geopolymer* dilakukan dengan mencari nilai R_b yang bertujuan untuk mendapatkan hasil berat jenis beton dengan *workability* baik agar memudahkan dalam proses pengerjaan. Dilakukan dua tahap percobaan, di mana pada tahap pertama dilakukan pembuatan benda uji dengan nilai R_b 1,25 dan 1,50 untuk mengetahui proses pengadukan serta berat jenis beton. Hasil ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan nilai R_b 1,25 diperoleh berat jenis beton rata-rata sebesar 5269,71 kg/m³ dan R_b 1,50 diperoleh berat

jenis beton rata-rata sebesar 4869,29 kg/m³. Dari hasil percobaan tahap pertama, dengan nilai R_b 1,25 memiliki berat jenis beton yang tinggi, berdasarkan ACI 304.3R-96 yang menyatakan syarat beton berat memiliki densitas sebesar 4810 kg/m³. Namun, selama proses pengerjaan cukup sulit karena menggunakan agregat kasar berupa potongan baja yang memiliki densitas 7,78 berdasarkan standar ACI 304.3R-96. Sedangkan, pembuatan benda uji dengan nilai R_b 1,50 agregat kasar masih mengalami segregasi karena memiliki jumlah rasio volume absolut mortar lebih tinggi dibandingkan dengan volume absolut agregat kasar, dapat dilihat pada Gambar 3.2 hasil pengujian rasio beton (R_b).

Pada tahap kedua, benda uji dibuat dengan menggunakan nilai R_b 1,37 menghasilkan *workability* yang ideal dan berat jenis beton yang proporsional untuk beton berat. Berdasarkan rasio optimum yang dihasilkan pada tahap kedua dilakukan pengujian *mechanical properties* dengan nilai R_m 1,5 dan R_b 1,37. Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat jenis beton rata-rata pada umur 1 hari adalah 5165,42 kg/m³, dan kuat tekan beton mencapai 27,62 MPa. Pada umur 28 hari berat jenis beton rata-rata adalah 5102,87 kg/m³, dan kuat tekan beton mencapai 63,40 MPa, dapat dilihat pada Tabel 3.1 hasil perancangan campuran beton berat *geopolymer*. Dikarenakan belum ada penelitian yang mengamati proporsi *mix design* beton berat *geopolymer* menggunakan *fly ash* kelas C dan GGBFS, penelitian ini merujuk pada hasil penelitian sebelumnya oleh Cornelis *et al.*, (2022). Hasil pengujian kuat tekan beton *geopolymer* menggunakan *fly ash* kelas C (beton *geopolymer* normal) menggunakan agregat kasar *natural river sand* yang berasal dari Celereng didapatkan hasil kuat tekan rata-rata adalah 47,76 MPa. Berdasarkan nilai kuat tekan beton berat *geopolymer* dalam penelitian ini mencapai 63,40 MPa, yang merupakan peningkatan signifikan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Cornelis *et al.*, 2022). Peningkatan ini dapat dihubungkan kepada pengaruh rasio mortar (R_m) dan rasio beton (R_b), serta penggunaan substitusi material GGBFS, yang secara konsisten membuktikan kemampuannya dalam meningkatkan kuat tekan, sebagaimana disampaikan oleh Teo *et al.*, (2022).



Gambar 3.2 Hasil Pengujian Rasio Beton (R_b).

Tabel 3.1. Hasil Perancangan Campuran Beton Berat *Geopolymer*.

No	Benda Uji	Umur (Hari)	Berat Jenis (kg/m ³)	Rata-Rata (kg/m ³)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata (MPa)
1	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	1	5346,13	5165,42	26,98	27,62
2	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	1	5044,78		31,18	
3	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	1	5249,40		24,33	
4	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	1	5021,37		28,00	
5	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	28	5104,46	5102,87	62,85	63,40
6	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	28	4968,66		68,31	
7	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	28	5149,20		48,56	
8	Rm 1,75 Rb 1,37 50:50	28	5189,15		73,87	

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental pada proporsi *mix design* beton berat *geopolymer*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengujian *flow* mortar dengan nilai R_m 1,75 memiliki *workability* yang baik dalam pengadukan beton berat *geopolymer*. Pengujian beton berat *geopolymer* dengan nilai R_b 1,37 menunjukkan hasil berat jenis beton sebesar 5102,87 kg/m³ dan kuat tekan beton mencapai 63,40 MPa. Berdasarkan penelitian yang dilakukan menggunakan rasio antara volume absolut pasta terhadap volume absolut rongga agregat halus (R_m) 1,75 dan rasio antara volume absolut mortar terhadap volume absolut rongga agregat kasar (R_b) 1,37 didapatkan proporsi *mix design* yang baik dalam *workability*, berat jenis beton dan kuat tekan beton, sehingga cocok digunakan dalam pembuatan beton berat *geopolymer* untuk perancangan dan konstruksi struktur bangunan, bahkan sebagai struktur dinding di

rumah sakit. Selain itu, penelitian ini membuka peluang untuk pengujian lanjutan, seperti pengujian radiasi, guna mengevaluasi ketahanan terhadap radiasi pada beton berat *geopolymer* yang dikembangkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Saya ucapkan terima kasih kepada PT. Krakatau Semen Indonesia yang telah memberikan dukungan material dalam penelitian ini.

REFERENSI

Alhadi, A. (2006) *PENGGUNAAN POTONGAN BAJA UNTUK BETON BERAT SEBAGAI PERISAI RADIASI SINAR GAMMA*.

Antoni, A. *et al.* (2020) ‘Fresh and Hardened Properties of High Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Matrix with High Dosage of Borax’, *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 44, pp. 535–543. Available at: <https://doi.org/10.1007/s40996-019-00330-7>.

Cornelis, R. *et al.* (2018) ‘The Investigation on Setting Time and Strength of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer’, *Applied Mechanics and Materials*, 881, pp. 158–164. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.881.158>.

Cornelis, R. *et al.* (2019) ‘Workability and Strength Properties of Class C Fly Ash-Based Geopolymer Mortar’, *MATEC Web of Conferences*, 258, p. 01009. Available at: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925801009>.

Cornelis, R. *et al.* (2022) ‘Effect of the Mortar Volume Ratio on the Mechanical Behavior of Class CI Fly Ash-Based Geopolymer Concrete’, *Civil Engineering Journal (Iran)*, 8(9), pp. 1920–1935. Available at: <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-09-012>.

Malkawi, A. *et al.* (2016) ‘Effects of Alkaline Solution on Properties of the HCFA Geopolymer Mortars’, *Procedia Engineering*, 148, pp. 710–717. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.581>.

Matsimbe, J. *et al.* (2022) ‘Geopolymer: A Systematic Review of Methodologies’, *Materials*. MDPI. Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15196852>.

Naresh, J. and Kiran, K. (2019) ‘STUDY ON BEHAVIOR OF HIGH DENSITY CONCRETE BY ADDING STEEL PUNCHES’, *International Journal of Research*, VIII, p. 222.

Öz, A. *et al.* (2022) ‘The radiation shielding and microstructure properties of quartzic and metakaolin based geopolymer concrete’, *Construction and Building Materials*, 342. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127923>.

Sasui, S. *et al.* (2020) ‘Strength and microstructure of class-C fly ash and GGBS blend geopolymer activated in NaOH & NaOH + Na₂SiO₃’, *Materials*, 13(1). Available at: <https://doi.org/10.3390/ma13010059>.

Satyarno, I. *et al.* (2014) ‘Practical method for mix design of cement-based grout’, in *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 356–365. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.194>.

Seoudi, M. *et al.* (2019) *POTENTIAL USE OF HEAVY WEIGHT CONCRETE FOR RADIATION SHEILDING IN EGYPT*.

Shobeiri, V. *et al.* (2021) ‘A comprehensive assessment of the global warming potential of geopolymer concrete’, *Journal of Cleaner Production*, 297. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126669>.

Teo, W. *et al.* (2022) ‘Experimental Investigation on Ambient-Cured One-Part Alkali-Activated Binders Using Combined High-Calcium Fly Ash (HCFA) and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)’, *Materials*, 15(4). Available at: <https://doi.org/10.3390/ma15041612>.

Widiana, N. (2022) *PENGARUH POLYPROPYLENE FIBER DAN STEEL FIBER TERHADAP BETON GEOPOLIMER*.