

# Kajian Eksperimental untuk Mengukur Kinerja *Ground Granulated Blast Furnace Slag* sebagai Pengganti Sebagian Semen terhadap Kekuatan Tekan dan Sorptivitas *Self-Compacting Mortar*

Nenny Samudra<sup>1</sup>, Herry Suryadi Djayaprabha<sup>1\*</sup>, Diana Darapuspa<sup>1</sup>

Dikirim: 13/03/2024

Direvisi: 23/10/2024

Diterima: 25/10/2024

## ABSTRAK

Peningkatan pembangunan infrastruktur di Indonesia, berdampak pada permintaan semen yang semakin meningkat. Industri semen menyumbangkan sekitar 8% emisi karbondioksida di dunia yang signifikan memberikan dampak buruk bagi lingkungan. *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS), yang merupakan limbah industri padat, dapat dimanfaatkan menjadi salah satu alternatif bahan substitusi sebagian semen untuk membuat material konstruksi yang ramah lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pemanfaatan limbah industri yaitu GGBFS sebagai substitusi semen pada mortar mutu tinggi untuk membuat *self-compacting mortar* (SCM). Variasi substitusi sebagian semen dengan GGBFS yang diambil untuk membuat SCM adalah sebesar 0%, 10% dan 20%. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari substitusi sebagian semen dengan GGBFS terhadap kekuatan tekan dan sorptivitas. Rasio air terhadap binder (*w/b*) diambil sebesar 0,3. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, kekuatan tekan SCM pada variasi 20% mencapai 61,8 MPa pada umur 28 hari. Pada campuran yang sama, diperoleh nilai *initial absorption* sebesar 0,0076 dan *secondary absorption* sebesar 0,0024 yang mengindikasikan campuran dengan substitusi sebagian semen dengan GGBFS sebesar 20% memiliki tingkat penyerapan air yang rendah dan memiliki durabilitas yang baik. Pemanfaatan GGBFS sebagai substitusi sebagian semen memiliki manfaat yang positif untuk menciptakan material konstruksi yang ramah lingkungan.

**Kata kunci:** *ground granulated blast furnace slag*, kekuatan tekan, *self-compacting mortar*, sorptivitas

## 1. PENDAHULUAN

Semen merupakan salah satu material konstruksi utama penyusun mortar dan beton pada pembangunan infrastruktur. Dimana, pada pembuatan semen dihasilkan emisi gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>) yang tinggi sehingga berdampak buruk bagi lingkungan, yang dapat menyebabkan terjadinya kenaikan suhu pada atmosfer yang dapat memicu pemanasan global. Proses pembuatan semen berkontribusi sebesar 8% dalam menyumbang emisi gas rumah kaca di dunia. Emisi CO<sub>2</sub> tersebut berasal dari proses pembakaran pada suhu yang tinggi dan konsumsi energi yang tinggi dalam pembuatan semen [1]. Dengan proyeksi bahwa pembangunan infrastruktur

---

<sup>1</sup> Universitas Katolik Parahyangan, Jl. Ciumbuleuit No. 94, Bandung 40141

\*Corresponding Author: [herry.suryadi.unpar@gmail.com](mailto:herry.suryadi.unpar@gmail.com)

menggunakan semen akan terus semakin meningkat, maka akumulasi dari emisi CO<sub>2</sub> yang dihasilkan oleh industri semen dapat mencapai 470 GT dalam rentang 30 tahun ke depan [2].

Untuk mengurangi emisi gas rumah kaca yang signifikan yang diakibatkan dari produksi semen, maka diperlukan suatu material alternatif yang dapat menggantikan sebagian semen sebagai bahan pengikat. Terdapat beberapa material yang umumnya dapat digunakan sebagai bahan pengganti sebagian semen karena memiliki sifat yang sementitus dan pozzolanik, yaitu *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS), *fly ash*, *silica fume*, dan metakaolin [3].

Pemanfaatan GGBFS sebagai material alternatif pengganti semen sudah dilakukan lebih dari 60 tahun lamanya. GGBFS merupakan bahan pengganti sebagian semen yang ramah lingkungan yang mampu meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas dari beton/mortar [4]. GGBFS adalah produk sampingan dari pembuatan produk baja dan besi, yang terbentuk ketika limbah berupa slag cair didinginkan dengan cepat dengan air dengan menggunakan *water jets* sehingga terbentuk slag berbentuk butiran/granular. Selanjutnya, butiran slag diproses lebih lanjut dengan melalui proses penggilingan untuk membuat GGBFS. GGBFS dimanfaatkan sebagai karena mengandung senyawa silika (SiO<sub>2</sub>), kapur (CaO), dan alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yang cukup tinggi, yaitu berkisar 35,09%, 37,79%, dan 17,54% secara berturut-turut [5]. Berdasarkan komposisi kimia yang dimiliki oleh GGBFS dapat mendukung terjadinya reaksi pozzolanik antara SiO<sub>2</sub> atau Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)<sub>2</sub>) yang terbentuk pada proses hidrasi semen [6]. Oleh karena itu pemanfaatan GGBFS yang berpotensi untuk menciptakan material konstruksi yang ramah lingkungan.

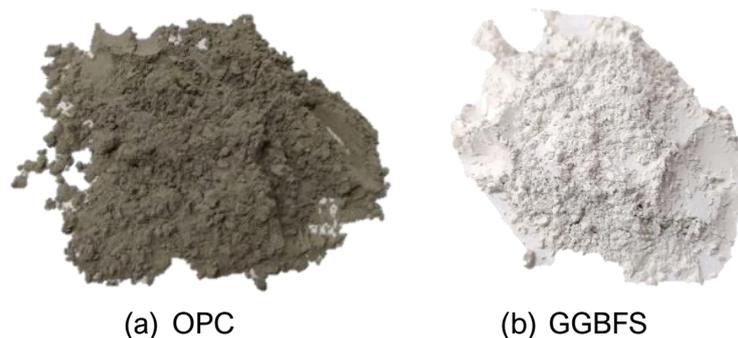
Kemampuan beton segar untuk dapat mengalir dengan beratnya sendiri dan mempertahankan homogenitas yang memadai tanpa adanya segregasi dan *bleeding*, yang dikenal dengan istilah *self-compacting concrete* (SCC), telah dikembangkan oleh Okamura dari Jepang pada tahun 1986. Viskositas yang baik dari SCC akan mengakibatkan campuran beton segar dapat mengalir dan mengisi bekisting dan celah-celahnya yang terhalang oleh tulangan tanpa diperlukannya getaran. Pada perencanaan SCC, Okamura dan Ouchi mengusulkan perencanaan karakteristik mortar pada SCC yang dikenal dengan *self-compacting mortar* (SCM) [7]. Sejalan, dengan perkembangan teknologi SCM juga telah dikembangkan sebagai mortar struktural [8] maupun mortar perbaikan (*repair mortar*) [9].

Durabilitas merupakan salah satu parameter yang penting dalam perencanaan material konstruksi khususnya mortar. Durabilitas pada mortar dapat dinilai dari kemudahan masuknya zat cair kedalam matriks mortar melalui sistem pori-pori. Salah satu cara pengujian durabilitas adalah dengan mengukur tingkat penyerapan air (sorptivitas) [10]. Penggunaan material yang bersifat pozzolanik khususnya GGBFS dapat membantu meningkatkan durabilitas dengan mengurangi pori-pori kapiler akibat pembentukan kalsium silikat hidrat (CSH) tambahan yang terbentuk dari reaksi pozzolanik [11].

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan kajian kinerja GGBFS sebagai material pengganti sebagian semen dengan variasi penggantian sebesar 0%, 10%, dan 20% terhadap kekuatan tekan dan sorptivitas SCM yang mempunyai potensi pemanfaatan sebagai material perbaikan struktur.

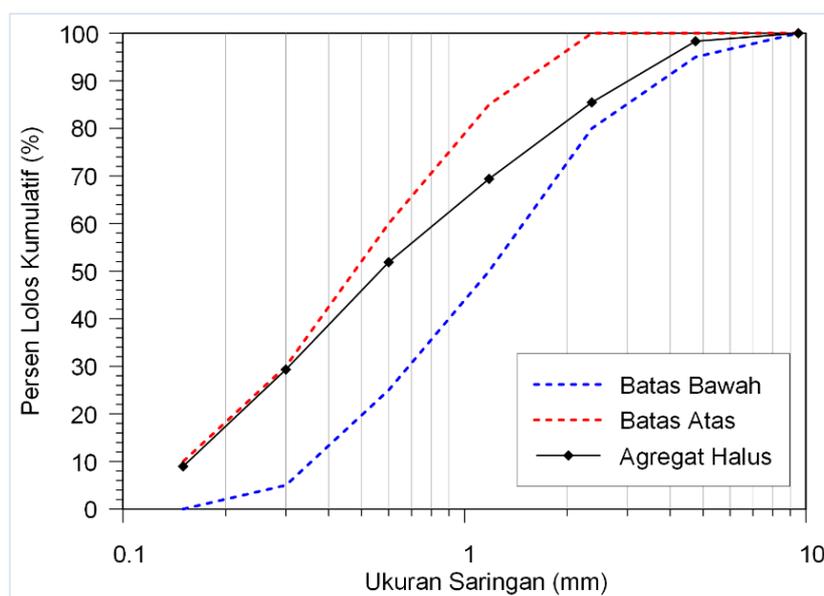
## 2. MATERIAL

Bahan pengikat yang digunakan dalam pembuatan SCM adalah ordinary Portland cement (OPC) dengan *specific gravity* sebesar 3,07 dan GGBFS *specific gravity* dengan *specific gravity* sebesar 2,83 yang diuji dengan acuan ASTM C188 [12]. Properti fisik dari kedua bahan pengikat tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bahan Pengikat SCM

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari daerah gunung Galunggung, Jawa Barat yang memiliki specific gravity sebesar 2,53 dan absorpsi sebesar 3,12% yang diuji berdasarkan ASTM C128 [13]. Pengujian gradasi agregat halus dilakukan sesuai dengan ASTM C136/C136M [14] dapat dilihat pada Gambar 2. Dimana agregat halus tersebut memenuhi batasan gradasi yang ditentukan oleh ASTM C33/33M [15] dengan besarnya modulus kehalusan sebesar 2,57.



Gambar 2. Analisis Saringan dari Agregat Halus

Superplasticizer digunakan untuk mengontrol properti segar dari SCM adalah berjenis *polycarboxylic ether* yang mempunyai kemampuan untuk mereduksi air dengan rentang yang tinggi dan meningkatkan kekuatan tekan awal.

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini perencanaan campuran SCM diformulasikan dengan menggunakan metode volume absolut dengan memformulasikan tiga buah campuran SCM dengan variasi penggantian sebagian semen dengan GGBFS sebesar 0%, 10%, dan 20%. Kebutuhan air pada campuran dihitung terhadap jumlah OPC dan GGBFS dengan menggunakan rasio air terhadap binder (w/b) [16]. Pada penelitian ini w/b ditetapkan sebesar 0,3 yang didapatkan berdasarkan *trial mix* yang dilakukan sebelumnya. Volume pasir ditetapkan sebesar 40% sesuai dengan rekomendasi EFNARC [17]. Detail proporsi campuran SCM dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Proporsi Campuran SCM

Kode	w/b	Air (kg/m <sup>3</sup> )	OPC (kg/m <sup>3</sup> )	GS (kg/m <sup>3</sup> )	AH (kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)
SCM-GS0		287,89	959,63	0	1013,01	1,30
SCM-GS10	0,3	286,61	859,82	95,54	1013,01	1,37
SCM-GS20		285,33	760,89	190,22	1013,01	1,25

Keterangan: SCM-GGBFS = *self-compacting mortar* dengan penggantian sebagian semen dengan GGBFS; angka menunjukkan besarnya persentase penggantian; OPC = *ordinary Portland cement*; GS = *ground granulated blast furnace slag*; AH = agregat halus; SP = *superplasticizer*

Properti segar dari SCM diuji dengan menggunakan peralatan *mini slump flow* dan *mini V-funnel* sesuai yang direkomendasikan oleh EFNARC [17]. Pengujian kekuatan tekan SCM dilakukan pada benda uji kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm yang mengacu pada ASTM C109/C109M [18]. Pengujian dilakukan menggunakan alat Compression Testing Machine (CTM) yaitu dengan memberikan gaya vertikal pada satu permukaan kubus hingga benda uji mengalami kegagalan dan kekuatan tekan maksimum didapatkan. Pengujian kekuatan tekan dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari. Pengujian sorptivitas merupakan salah satu metode untuk mengetahui tingkat penyerapan air yang dilakukan sesuai dengan acuan ASTM C1585 [19] dengan melakukan modifikasi benda uji berupa kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Qureshi dan Ghosh (2014) [20]. Pengujian ini dilakukan untuk menentukan tingkat penyerapan air oleh benda uji yang dengan mengukur peningkatan massa spesimen ( $m_t$ ) yang dihasilkan dari penyerapan air sebagai fungsi waktu ( $t$ ) pada suatu luasan permukaan benda uji ( $a$ ) yang bersentuhan dengan air dengan massa jenis  $d$ . Besarnya absorpsi ( $I$ ) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (1).

$$I = \frac{m_t}{a \times d} \quad (1)$$

Benda uji yang telah dikondisikan sesuai dengan ASTM C1585 [19], kemudian dilakukan perendaman didalam air, kemudian absorpsi dihitung pada saat benda uji mulai kontak dengan air dan yang dihitung pada interval 1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300, and 360 menit untuk penentuan *initial absorption* dan pengujian setiap hari hingga hari ke-8 dilakukan untuk menentukan *secondary absorption*. Ilustrasi pengujian sorptivitas dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengujian Sorptivitas

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### Properti Segar SCM

Pengujian *slump flow* dilakukan untuk mengetahui kemampuan SCM untuk dapat mengalir dan mengisi ke seluruh bagian dengan beratnya sendiri. Hasil pengujian *slump flow* dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, SCM dengan kadar GGBFS 20% memiliki nilai *slump flow* sebesar 275 mm. Dengan kadar superplasticizer yang hampir sama terlihat adanya

peningkatan diameter *slump flow* yang diakibatkan karena peningkatan kadar GGBFS. GGBFS memberikan pengaruh penurunan nilai kekentalan dalam campuran SCM.

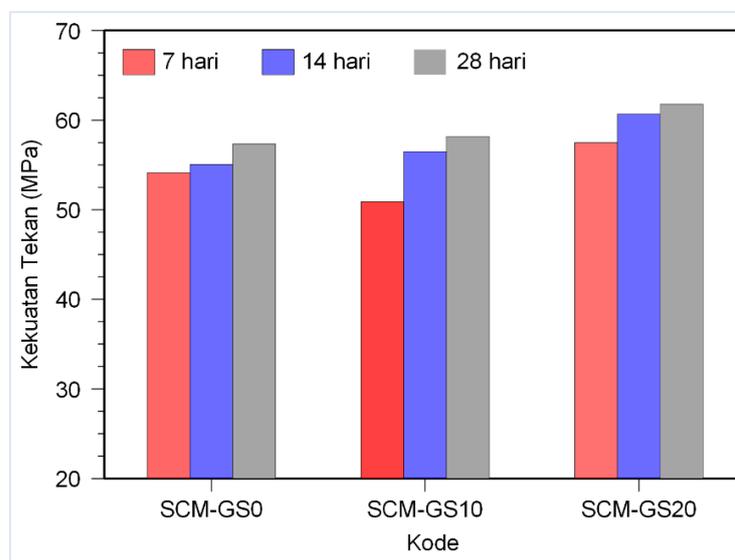
Pengujian *mini V-Funnel* dilakukan untuk menilai nilai kemampuan *filling ability* dari SCM, yaitu kemampuan untuk memastikan bahwa campuran SCM dapat mengalir dalam kondisi homogen. Hasil pengujian *mini V-Funnel* dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan hasil pengujian tersebut, SCM dengan kadar GGBFS 20% memiliki *V-Funnel time* sebesar 10 detik. Adanya penurunan *V-funnel time* campuran ini diakibatkan karena peningkatan kadar GGBFS.

Tabel 2. Properti Segar SCM

Parameter	SCM-GS0	SCM-GS10	SCM-GS20
Slump flow (mm)	260	270	275
V-funnel time (det)	11	10,5	10

### Kekuatan Tekan

Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan SCM yang diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari dengan substitusi kadar GGBFS 0%, 10% dan 20% sebagai pengganti sebagian semen. Pada umur 7 hari memiliki nilai kuat tekan sebesar 54,1 MPa, 50,9 MPa, dan 57,5 MPa. Pada umur 14 hari memiliki nilai kuat tekan 55,1 MPa, 56,5 MPa dan 60,7 MPa, sedangkan pada umur 28 hari memiliki nilai kuat tekan 57,3 MPa, 58,2 MPa dan 61,8 MPa. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin besar kadar SCM dengan persentase substitusi GGBFS sebesar 0%, 10% dan 20% menghasilkan nilai kuat tekan yang semakin tinggi. Hal tersebut disebabkan oleh aktivitas pozolanik dari GGBFS dimana  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bereaksi dengan  $\text{Ca(OH)}_2$  untuk membentuk C-S-H gel yang akan meningkatkan kekuatan tekan [21]. Berdasarkan hasil pengujian, kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada variasi substitusi 20% pada umur 28 hari sebesar 61,8 MPa dapat dikategorikan sebagai mortar struktural karena memiliki kekuatan tekan yang lebih besar dari 45 MPa yang dapat dimanfaatkan sebagai *repair mortar* [22].



Gambar 4. Hasil Pengujian Kekuatan Tekan SCM

### Sorptivitas

Pengujian sorptivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi GGBFS terhadap tingkat penyerapan air pada mortar dengan mengukur peningkatan massa benda uji terhadap fungsi waktu yang diakibatkan karena terjadi penyerapan air pada satu permukaan benda uji yang bersentuhan dengan air. Pengujian sorptivitas mencatat pengukuran perubahan massa spesimen selama enam jam pertama, yang dihitung pada interval 1, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 180, 240, 300,

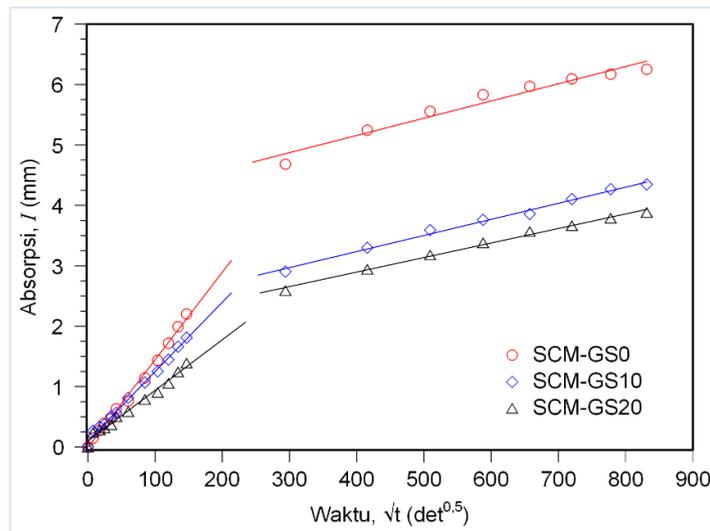
dan 360 menit setelah benda uji mulai kontak dengan air untuk penentuan *initial absorption* ( $S_i$ ) dan pengujian setiap hari hingga hari ke-8 dilakukan untuk menentukan *secondary absorption* ( $S_s$ ). Berdasarkan data pengujian dapat diperoleh hubungan antara tingkat penyerapan air ( $I$ ) terhadap waktu ( $\sqrt{t}$ ), kemudian regresi linier dibuat untuk menghitung  $S_i$  dan  $S_s$  yang merupakan gradien garis seperti terlihat pada Persamaan (2) dan (3).

$$I = S_i \sqrt{t} + b \quad (2)$$

$$I = S_s \sqrt{t} + b \quad (3)$$

Gambar 5 memperlihatkan bahwa pada *initial absorption*, kemiringan kurva lebih curam, hal ini menunjukkan bahwa *initial absorption* lebih cepat, dimana air akan menyerap melalui pori-pori yang lebih besar pada kurun waktu enam jam pertama, sedangkan pada *secondary absorption* kemiringan kurva lebih landai, menandakan penyerapan mengisi pori-pori kapiler yang lebih kecil.

Tabel 3 memperlihatkan bahwa semakin besar persentase substitusi GGBFS maka besarnya  $S_i$  dan  $S_s$  semakin kecil, yang bermakna bahwa tingkat penyerapan air semakin berkurang, karena terjadi porositas yang lebih sehingga dapat disimpulkan dengan penambahan GGBFS, mempunyai kemampuan untuk meningkatkan durabilitas mortar.



Gambar 5. Hasil Pengujian Sorptivitas SCM

Tabel 3. Persamaan Regresi *Initial Absorption* dan *Secondary Absorption*

Kode	<i>Initial Absorption</i> $I = S_i \sqrt{t} + b$	<i>Secondary Absorption</i> $I = S_s \sqrt{t} + b$
SCM-GS0	$I = 0,0145\sqrt{t} - 0,0062$ $R^2 = 0,994$	$I = 0,0029\sqrt{t} + 4,0164$ $R^2 = 0,956$
SCM-GS10	$I = 0,0115\sqrt{t} + 0,0989$ $R^2 = 0,994$	$I = 0,0027\sqrt{t} + 2,1709$ $R^2 = 0,992$
SCM-GS20	$I = 0,0076\sqrt{t} + 0,1214$ $R^2 = 0,983$	$I = 0,0024\sqrt{t} + 1,9339$ $R^2 = 0,993$

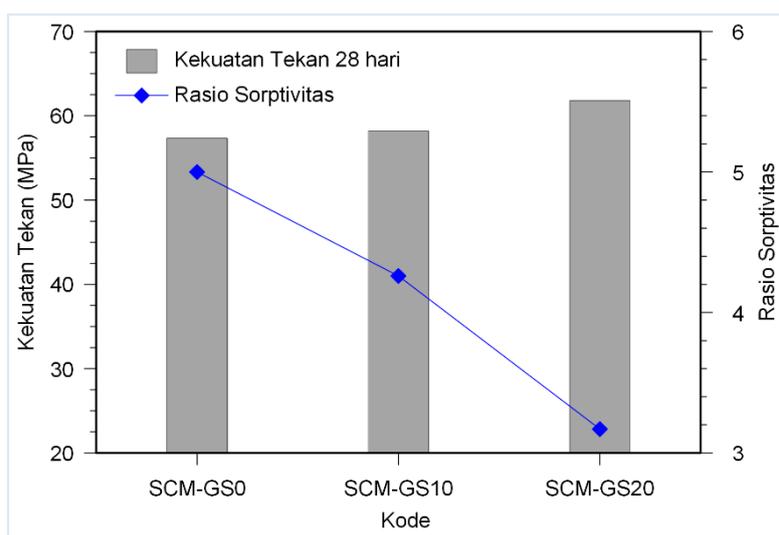
#### Hubungan Kekuatan Tekan dan Rasio Sorptivitas

Rasio *initial absorption* terhadap *secondary absorption* dikenal dengan rasio sorptivitas ( $S_i / S_s$ ) merupakan salah satu parameter yang penting dapat digunakan untuk memberi penilaian pada durabilitas [20]. Berdasarkan hasil yang diperoleh dari pengujian sorptivitas diperoleh bahwa SCM dengan persentase substitusi GGBFS sebesar 0%, 10%, dan 20% menghasilkan nilai rasio sorptivitas sebesar 5,00; 4,26; dan 3,17 dengan data yang terlihat pada Tabel 4. Seperti terlihat

pada Gambar 6 bahwa nilai sorptivitas yang lebih rendah, menghasilkan kekuatan tekan yang lebih tinggi. Sehingga, nilai rasio sorptivitas dapat digunakan untuk menilai durabilitas dari SCM yang menandakan bahwa pemanfaatan GGBFS sebagai pengganti sebagian semen mampu meningkatkan durabilitas. Substitusi yang paling optimum adalah SCM dengan persentase substitusi GGBFS sebesar 20%, karena menghasilkan nilai rasio sorptivitas yang paling kecil yaitu sebesar 3,17 disebabkan oleh struktur pori yang lebih padat dari SCM dengan persentase substitusi GGBFS lainnya. Ratio sorptivitas yang paling kecil menghasilkan nilai kuat tekan terbesar yaitu 61,8 MPa, sehingga dapat disimpulkan substitusi GGBFS sebesar 20%, memiliki tingkat durabilitas yang baik.

Tabel 4. Rasio Sorptivitas pada SCM

Kode	Initial Absorption ( $S_i$ )	Secondary Absorption ( $S_s$ )	Rasio Sorptivitas ( $S_i / S_s$ )
SCM-GS0	0,0145	0,0029	5,00
SCM-GS10	0,0115	0,0027	4,26
SCM-GS20	0,0076	0,0024	3,17



Gambar 6 Hubungan Kekuatan Tekan dan Rasio Sorptivitas

## 5. KESIMPULAN

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa SCM dengan persentase substitusi GGBFS yang lebih besar menghasilkan nilai kekuatan tekan semakin besar. Dimana, berdasarkan kekuatan tekan pada 28 hari, pada substitusi GGBFS sebesar 10% terjadi peningkatan kekuatan tekan sebesar 1,5% dan pada substitusi GGBFS sebesar 20% terjadi peningkatan kekuatan tekan sebesar 7,76 % apabila hasil-hasil tersebut dibandingkan dengan kekuatan tekan pada substitusi kadar GGBFS sebesar 0%. SCM dengan kadar substitusi GGBFS 0%, 10% dan 20% menghasilkan nilai rasio sorptivitas sebesar 5,00; 4,26; dan 3,17. Dapat disimpulkan bahwa SCM dengan persentase substitusi GGBFS yang lebih lebih besar menghasilkan nilai rasio sorptivitas yang semakin rendah, dimana rasio sorptivitas yang rendah menunjukkan tingkat durabilitas SCM yang lebih tinggi. Nilai kekuatan tekan optimum didapatkan pada SCM pada persentase substitusi GGBFS sebesar 20%, yaitu sebesar 61,8 MPa, dengan ratio sorptivitas terkecil sebesar 3,17 yang menghasilkan tingkat durabilitas yang terbaik. Pemanfaatan GGBFS sebagai pengganti sebagian semen memiliki manfaat yang positif untuk menciptakan material konstruksi yang ramah lingkungan dan yang mempunyai potensi pemanfaatan sebagai mortar struktural sebagai material perbaikan struktur.

## DAFTAR RUJUKAN

- [1] Lehne, J dan Preston, F, *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Chatham House, 2018.
- [2] Seto, K C, Dhakal, S, Bigio, A, Blanco, H, Delgado, G C, Dewar, D, Huang, L, Inaba, A, Kansal, A, Lwasa, S, McMahon, J, Müller, D B, Murakami, J, Nagendra, H dan Ramaswami, A, *Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 2014.
- [3] Ahmad, J, Kontoleon, K J, Majdi, A, Naqash, M T, Deifalla, A F, Kahla, N B, Isleem, H F dan Qaidi, S M A, "A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production," *Sustainability*, vol. 14, no.(14), hal. 8783, 2022, doi: 10.3390/su14148783.
- [4] Djayaprabha, H S, Chang, T-P, Shih, J-Y dan Nguyen, H-A, "Improving the mechanical and durability performance of No-cement self compacting concrete by fly ash," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 32, no.(9), hal. 04020245, 2020, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003281.
- [5] Yuksel, I, *Blast-furnace Slag. In: Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete Characterisation, Properties and Applications*. Woodhead Publishing Series, 2018.
- [6] Sandybay, S, Shon, C S, Tukaziban, A, Syzdykov, D, Orynbassarov, I, Zhang, D dan Kim, J R, "Blended Basic Oxygen Furnace (BOF) Slag with Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) as a Pozzolan Material," *Materials Science Forum*, vol. 1053, hal. 331-337, 2022, doi: 10.4028/p-q7n2cu.
- [7] Okamura, H dan Ouchi, M, "Self-Compacting Concrete," *J. Adv. Concr. Technol*, vol. 1, no.(1), hal. 5-15, 2003, doi: 10.3151/jact.1.5.
- [8] Santamaría, A, González, J J, Losáñez, M M, Skaf, M dan Ortega-López, V, "The Design of Self-compacting Structural Mortar Containing Steelmaking Slags as Aggregate," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 111, hal. 2020, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103627.
- [9] Ding, H, Shen, X, Chen, A, Gu, R, Fang, Y dan Li, D, "Study on the Effect of Three Types of Calcium Sulfate on the Early Hydration and Workability of Self-Compacting Repair Mortar," *Materials* vol. 16, no.(16), hal. 5648, 2023, doi: 10.3390/ma16165648.
- [10] Hammat, S, Menadi, B, Kenai, S, Khatib, J dan Kadri, E-H, "Properties of Self-Compacting Mortar Containing Slag with Different Finenesses," *Civ. Eng. J.*, vol. 7, no.(5), hal. 840-856, 2021, doi: 10.28991/cej-2021-03091694.
- [11] Hadsadok, A, Kenai, S, Courard, L, Michel, F dan Khatib, J, "Durability of mortar and concretes containing slag with low hydraulic activity," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 34, hal. 671-677, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.02.011.
- [12] ASTM C188-18, *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. ASTM International, 2018.
- [13] ASTM C-128-15, *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. ASTM International, 2015.
- [14] ASTM C136/C136M-14, *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. ASTM International, 2014.
- [15] ASTM C33/C33M, *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, 2016.
- [16] Aitcin, P-C, *The Importance of the Water–Cement and Water–Binder Ratios. In: Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016.
- [17] EFNARC, *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. European Federation of National Associations Representing for Concrete, 2002.
- [18] ASTM C109/C109M-16, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. ASTM International, 2016.

- [19] ASTM C1585-13, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*. ASTM International, 2013.
- [20] Qureshi, M N dan Ghosh, S, "Sorptivity Ratio and Compressive Strength of Alkali-Activated Blast Furnace Slag Paste," *Adv. Civ. Eng. Matls.*, vol. 3, no.(1), hal. 238-255, 2014, doi: 10.1520/ACEM20130113.
- [21] Xu, C, Li, H dan Yang, X, "Effect and Characterization of the Nucleation C-S-H Seed on the Reactivity of Granulated Blast Furnace Slag Powder," *Constr. Build. Mater.*, vol. 238, hal. 117726, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117726.
- [22] Sakir, S, Raman, S N, Safiuddin, M, Kaish, A B M A dan Mutalib, A A, "Utilization of By-Products and Wastes as Supplementary Cementitious Materials in Structural Mortar for Sustainable Construction," *Sustainability*, vol. 12, no.(9), hal. 3888, 2020, doi: 10.3390/su12093888.