



EKSPERIMEN SUBSTITUSI SERBUK KACA PADA BINDER UNTUK MENINGKATKAN KUAT TEKAN BETON SELF-COMPACTING CONCRETE (SCC) PADA USIA 1 HARI

Adji Putra Abriantoro^{1*}, Sri Endah Susilowati²

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta, DKI Jakarta

adji.putra@uta45jakarta.ac.id

ABSTRACT

Self-Compacting Concrete (SCC) is an innovative type of concrete that can compact itself. SCC offers better environmental, social, and economic benefits compared to conventional concrete. The use of glass waste as a substitute for cement in SCC has shown pozzolanic activity and improved concrete properties. Previous studies have examined partial cement replacement with glass powder, but this study aims to determine the optimal percentage based on experimental results. The study used 12 samples, with three samples for each variation. Glass powder variations of 0%, 5%, 10%, and 15% were employed. The controlled variable was the use of glass powder as a binder substitute, while the measured variables were concrete compressive strength at 1-day age and flowability. In this study, glass powder replacement variations of 0%, 5%, 10%, and 15% by binder weight were utilized. The results showed that a 10% replacement resulted in higher SCC compressive strength at 1-day age. However, a 15% replacement led to a decrease in compressive strength. Further evaluation is needed to understand the long-term performance of SCC with glass powder replacement. The use of glass powder as a substitute also proportionally enhanced SCC's flowability with the replacement percentage. Nonetheless, other aspects such as mechanical properties and sustainability should also be considered.

Keywords: *Compressive Strength, Flowability, Glass Powder, SCC*

ABSTRAK

Beton SCC adalah jenis beton inovatif yang dapat memadat secara mandiri. SCC memiliki manfaat lingkungan, sosial, dan ekonomi yang lebih baik dibandingkan beton konvensional. Penggunaan limbah kaca sebagai pengganti semen dalam SCC telah menunjukkan aktivitas pozzolanik dan meningkatkan sifat beton. Beberapa penelitian menguji penggantian sebagian semen dengan serbuk kaca, tetapi penelitian ini bertujuan untuk menentukan persentase optimal berdasarkan hasil eksperimen. Penelitian ini menggunakan 12 sampel dengan tiga sampel untuk setiap variasi. Serbuk kaca dengan variasi 0%, 5%, 10%, dan 15% digunakan. Variabel yang dikendalikan adalah penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi binder, sedangkan variabel yang diukur adalah kuat tekan beton pada usia 1 hari dan flowability. Dalam penelitian ini, variasi penggantian serbuk kaca sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat binder digunakan. Hasilnya menunjukkan bahwa penggantian 10% menghasilkan kuat tekan beton SCC yang lebih tinggi pada umur 1 hari. Namun, penggantian 15% mengakibatkan penurunan kuat tekan. Evaluasi lebih lanjut diperlukan untuk memahami kinerja jangka panjang beton SCC dengan penggantian serbuk kaca. Penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi juga meningkatkan flowability beton SCC secara proporsional dengan persentase penggantian. Meskipun demikian, aspek lain seperti sifat mekanik dan keberlanjutan juga harus dipertimbangkan.

Kata kunci: Beton SCC, *Flowability*, Kuat Tekan, Serbuk Kaca

1. PENDAHULUAN

Beton *self-compacting concrete* (SCC) merupakan jenis beton inovatif yang memberikan banyak manfaat secara signifikan. Beton ini dapat memadat secara mandiri mengompakkan diri dengan sempurna berdasarkan beratnya sendiri dengan gaya gravitasi tanpa memerlukan getaran eksternal [1]. Beton SCC memiliki manfaat yang meliputi aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi yang lebih menguntungkan dibandingkan dengan beton yang dipadatkan secara konvensional, sehingga dapat dianggap sebagai jenis beton yang lebih berkelanjutan [2]. Selain itu, SCC juga menawarkan sejumlah keunggulan, seperti finishing yang baik, kualitas konstruksi yang sangat baik, waktu pengecoran yang singkat, biaya tenaga kerja yang lebih rendah, tidak ada polusi suara, serta kemudahan pengecoran di area yang padat dengan tulangan baja. Hal ini memungkinkan adanya lebih banyak pilihan dalam desain sistem konstruksi [3] [4]. Beton jenis ini diproduksi menggunakan bahan dasar yang sama dengan beton konvensional, yaitu semen, air, agregat, serta aditif atau bahan tambahan [1]. Namun, penggunaan jumlah besar bahan pengikat dan kebutuhan akan aditif kimia untuk meningkatkan sifat beton segar dapat meningkatkan biaya awal. Penggunaan kuantitas semen yang tinggi dalam SCC dapat menyebabkan peningkatan risiko retak akibat penyusutan [5]. Dalam penelitian ini, ditemukan bahwa pengurangan kandungan semen dalam SCC dengan menggunakan bahan alternatif dapat mengembangkan teknologi beton pracetak dan aplikasi beton di lokasi dengan biaya yang lebih ekonomis dan penggunaan dosis superplastisizer yang lebih rendah [6]. Oleh karena itu, salah satu tantangan utama dalam produksi beton SCC adalah biaya awal yang tinggi akibat penggunaan kandungan semen dan aditif kimia yang tinggi, serta dampak lingkungan yang timbul dari emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses pembuatan semen.

Beberapa penelitian yang komprehensif telah dilakukan untuk menggunakan bahan limbah sebagai pengganti semen Portland, seperti abu terbang, abu silika, slag terak granulasi halus, dan metakaolin. Bahan-bahan limbah industri dan bahan daur ulang berbagai jenis digunakan untuk menghasilkan material yang ramah lingkungan dengan biaya yang lebih kompetitif untuk menggantikan bahan bangunan tradisional [7]. Jumlah limbah kaca yang terus-menerus dihasilkan telah meningkat secara signifikan karena perubahan gaya hidup dan pertumbuhan industrialisasi. Oleh karena itu, penggunaan limbah ini dalam produksi beton modern telah menarik perhatian di seluruh dunia dari segi lingkungan dan ekonomi. Baru-baru ini, beberapa penelitian telah menginvestigasi penggunaan limbah kaca yang digiling sebagai alternatif semen dalam industri konstruksi [8][9]. Secara umum, penelitian terbaru menunjukkan bahwa limbah kaca yang digiling menjadi partikel-partikel berukuran mikro menunjukkan tingkat aktivitas pozzolanik dalam beton. Partikel-partikel kaca daur ulang yang sangat halus diyakini berperan sebagai bahan pozzolanik yang dapat membentuk gel baru (kalsium-silikat hidrat) dengan jumlah produk hidrasi yang tinggi [10]. Material pozzolanik yang biasanya terdapat dalam beton seharusnya memiliki kandungan silika yang tinggi dan bersifat amorf dengan permukaan yang luas. Bubuk kaca diyakini memiliki jumlah yang memadai dari kandungan silika amorf yang dapat merangsang sifat pozzolanik jika digiling menjadi ukuran yang sangat kecil [11].

[12] mengemukkan beton normal dengan penggantian sebagian semen oleh serbuk kaca dalam campuran beton. Penelitian ini bertujuan untuk menguji sifat-sifat setelah pengerasan, termasuk kekuatan tekan, kekuatan belah, berat jenis, dan uji ultrasonik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggantian sebagian semen (10-25%) berdasarkan berat dapat menghasilkan beton normal ramah lingkungan dan meningkatkan semua sifat setelah pengerasan. Sejalan dengan hal itu [13] bahwa sifat rheologi dan mekanik beton mengalami penurunan seiring peningkatan kandungan serbuk kaca, [14] kemungkinan produksi beton normal berkelanjutan yang ramah lingkungan dengan menggunakan tingkat limbah kaca yang berbeda (10, 20, 30, 40, dan 50) % berdasarkan berat sebagai pengganti sebagian semen dan pasir. Mereka menyatakan bahwa penggantian ini dapat efektif dalam mengurangi emisi karbon dioksida dari industri semen. Uji laboratorium, seperti uji kekuatan tekan residu setelah memanaskan sampel selama periode tertentu, menunjukkan bahwa penggantian sebesar 20% menghasilkan kekuatan residu tertinggi yang hampir setara dengan campuran beton referensi. Kinerja beton kaca yang dapat mengalir sendiri dengan penggantian sebagian agregat halus (10-50%) berdasarkan berat menggunakan kaca daur ulang. Penelitian ini fokus pada kelenturan kerja dan karakteristik mekanik beton. Dalam penelitian ini,

dilakukan 18 campuran beton dengan konten semen yang berbeda (350, 400, 450) kg/m³ pada perbandingan air-semen yang sama. Ditemukan bahwa peningkatan kandungan kaca menyebabkan peningkatan aliran slump, namun kekuatan tekan, kekuatan belah, dan kekuatan lentur mengalami penurunan [15]. Oleh karena itu, tujuan dari penelitian ini tidak hanya untuk menentukan performa terbaik, tetapi juga untuk memberikan persentase penggantian yang tepat secara optimum melalui optimisasi hasil-hasil eksperimental pada kuat tekan beton SCC umur 1 hari.

2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, terdapat tiga sampel untuk setiap variasi, dengan total keseluruhan sampel sebanyak 12. Serbuk kaca yang digunakan dalam penelitian ini memiliki komposisi berbeda, yaitu 0%, 5%, 10%, dan 15% dengan masing-masing variasi diwakili oleh 3 sampel. Variabel yang dikendalikan dalam penelitian ini adalah variasi penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi binder, sementara variabel yang diukur adalah kuat tekan beton pada usia 1 hari, dan kecenderungan aliran (*flowability*). Untuk menguji kuat tekan beton pada usia 1 hari, dilakukan pengujian pada sampel silinder berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk menentukan persentase serbuk kaca yang optimal guna mencapai target kuat tekan tertinggi. Pengujian *flowability* dilakukan dengan mengukur diameter maksimum slump flow yang harus memenuhi standar EFNARC. Penelitian ini menggunakan seluruh anggota populasi untuk dijadikan sampel. Berikut rincian sampel benda uji pada table dibawah ini:

Tabel 1. Rincian sampel benda uji

No.	Presentasi Serbuk kaca	Accelerator	Superplasticizer	Uji Slump Flow	Uji Tekan 1 hari
1	0%	1,5%	1,3%	1 sampel	3 sampel
2	5%	1,5%	1,3%	1 sampel	3 sampel
3	10%	1,5%	1,3%	1 sampel	3 sampel
4	15%	1,5%	1,3%	1 sampel	3 sampel
Jumlah				4 sampel	12 sampel

Data yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan dengan menggunakan analisis regresi linier sederhana untuk menentukan apakah variasi serbuk kaca berpengaruh atau tidak terhadap beton SCC.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Mix Design Beton

Dalam pembuatan beton SCC, digunakan metode mix design yang merupakan modifikasi dari metode mix design ACI. Modifikasi ini menggabungkan pendekatan mix design sederhana yang dikembangkan oleh Okamura dari Jepang pada awal 1980-an. Hal ini dilakukan karena metode mix design konvensional tidak lagi sepenuhnya cocok untuk mencapai hasil mix design yang optimal pada beton SCC. Oleh karena itu, modifikasi mix design diperlukan. Adapun penentuan komposisi awal tiap bahan adalah sebagai berikut :

- Agregat kasar dibatasi jumlahnya sekitar kurang lebih 50 % dari total volume beton supaya bisa mengalir dan memadat sendiri tanpa alat pemadat.
- Perbandingan volume agregat halus dan agregat kasar adalah 51% : 49%
- Perbandingan Semen dan bahan pozzolan seperti limbah serbuk kaca diambil variasi 0%, 5% , 10%, dan 15%.
- Dosis admixture berupa superplasticizer (merek yang digunakan: Master Ease 5010) dan accelerator (merek yang digunakan: Master Life) dosis yang diberikan masing-masing secara berurutan adalah diberikan dosis 1,3% dan 1,5% dari jumlah total penggunaan bahan cementitious.
- Jumlah benda uji dari variasi sample berjumlah masing-masing 3 buah benda uji silinder ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Tahapan selanjutnya adalah perencanaan *mix design* perencanaan mutu beton padat mandiri dilaksanakan menggunakan EFNARC (*The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*) tahun 2005. Berikut adalah langkah-langkah dalam perhitungan *mix design* :

- Jenis semen ditentukan yaitu semen Portland tipe 1
- Untuk nilai-nilai tertentu EFNARC telah menentukan standar sebagai berikut:

Tabel 2. Standar EFNARC

Bahan	Kadar Terhadap Berat (kg/m ³)	Kadar Terhadap Volume (l/m ³)
Binder	380-600	-
Air	150-210	150-230
Agregat Kasar	750-1000	270-360
Agregat Halus	Penggunaan agregat halus adalah 45%-55% dari berat agregat	
FAS	0,30-0,55	0,85-1,10

- Setelah itu langkah selanjutnya adalah perbandingan volume agregat halus dan agregat kasar adalah 51% : 49%
- Perbandingan Semen dan bahan pozzolan seperti limbah serbuk kaca. Perencanaan campuran *mix design* beton memadat mandiri atau *self-compacting concrete* (SCC) dilaksanakan menggunakan metode *simple mix design* dengan mengacu pada standar EFNARC (*The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*) tahun 2005. Data-data perhitungan dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3. Hasil Perhitungan *Mix Design* untuk 1m³

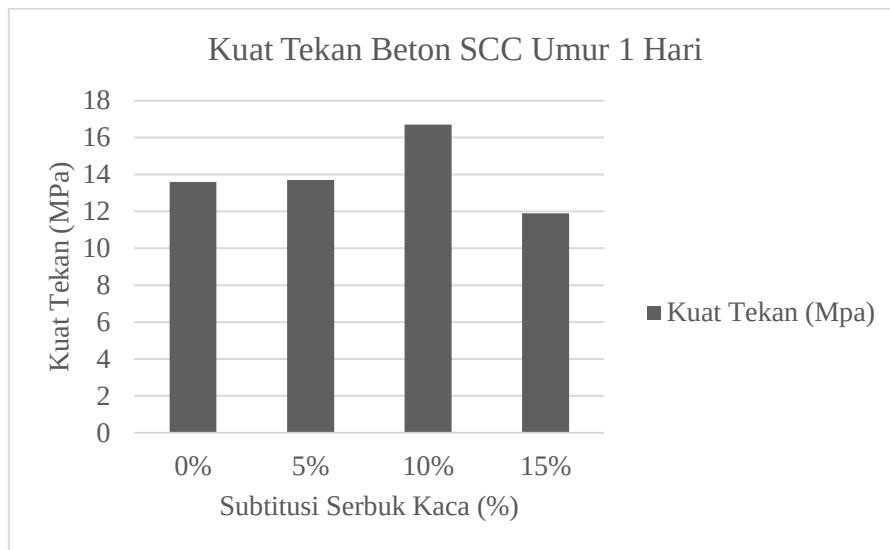
Variasi Serbuk Kaca	Kebutuhan Bahan						
	Serbuk Kaca (Kg)	Accelerator (Kg)	PC (Kg)	Pasir (Kg)	Kerikil (Kg)	Air (L)	Superplasticizer (Kg)
1 0%	0	8,25	550	755	753	165	7,15
2 5%	27,5	8,25	522,5	755	753	165	7,15
3 10%	55	8,25	495	755	753	165	7,15
4 15%	82,5	8,25	467,8	755	753	165	7,15

Hasil Pengujian Kuat Tekan 1 Hari

Pengujian kuat tekan beton SCC umur 1 hari ini diperoleh dari pengujian beton keras dengan sampel silinder ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang telah berumur ± 24 jam setelah dilakukan pengecoran kedalam cetakan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat CTM. Hasil perhitungan kuat tekan beton umur 1 hari dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 1.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Umur 1 Hari

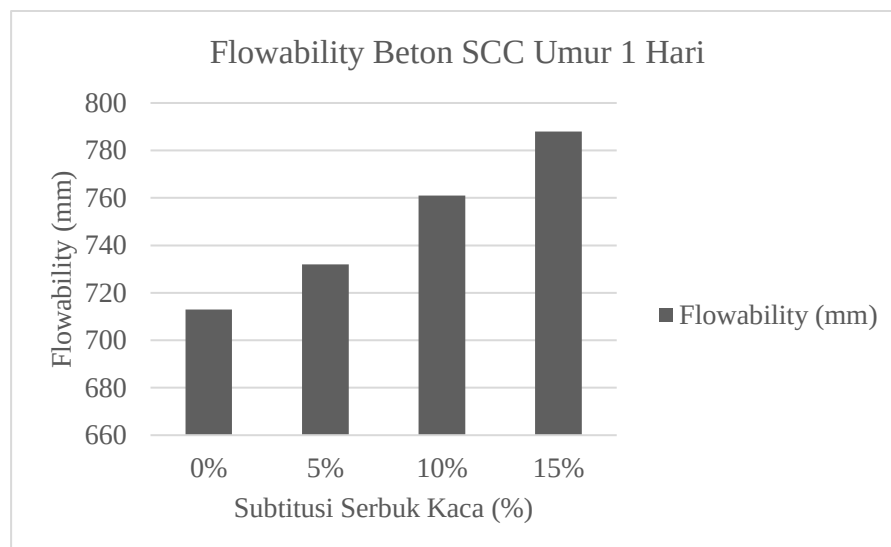
Kode Sampel	Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata (MPa)
0% (1)	13,5	13,6
0% (2)	14,2	
0% (3)	13,3	
5% (1)	13,2	13,7
5% (2)	14,1	
5% (3)	13,8	
10% (1)	16,3	16,7
10% (2)	17,3	
10% (3)	16,5	
15% (1)	12,4	11,9
15% (2)	10,7	
15% (3)	12,6	

**Gambar 1.** Kuat tekan umur 1 hari**Hasil Pengujian Flowability**

Pengujian *flowability* atau biasa disebut *slump flow* yang dilakukan pada saat beton segar telah selesai dibuat dengan cara menuangkan beton segar kedalam kerucut Abrams tanpa adanya rojokan atau pemadatan. Pada pengujian ini dilihat seberapa besar diameter sebaran maksimum yang didapat. Dengan jumlah percobaan dilakukan sebanyak 3 kali dari masing-masing variasi sampel beton segar.

Tabel 6. Hasil Pengujian *Flowability*

Kode Sampel	Diameter 1 (mm)	Diameter 2 (mm)	Diameter Sebaran Maksimum (mm)
0%	710	715	713
5%	730	734	732
10%	755	766	761
15%	780	795	788

**Gambar 2.** Hasil Pengujian *Flowability*

Pembahasan Hasil Analisis Data

Kuat Tekan Beton Umur 1 Hari

Penggunaan substitusi serbuk kaca dalam campuran beton self-compacting (SCC) telah menjadi subjek penelitian yang menarik dalam beberapa tahun terakhir. Pada umumnya, substitusi serbuk kaca dalam beton SCC memiliki potensi untuk meningkatkan sifat mekanik dan tahan lama beton. Hal ini disebabkan oleh karakteristik fisik serbuk kaca, termasuk ukuran partikel yang halus dan kemampuan reaktifitas kimia dengan matriks semen. Namun, efek penggantian serbuk kaca dalam beton SCC tergantung pada persentase penggantian yang digunakan. Dalam penelitian ini, dilakukan variasi penggantian serbuk kaca sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dari berat binder dalam campuran beton SCC. Pengukuran kuat tekan beton SCC pada umur 1 hari digunakan sebagai indikator awal untuk mengevaluasi pengaruh penggantian serbuk kaca.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan substitusi serbuk kaca dengan variasi 10% dari berat binder mampu meningkatkan kuat tekan beton SCC pada umur 1 hari dibandingkan dengan variasi 5% dan 15%. Ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, partikel serbuk kaca yang halus dapat memperbaiki pengisian ruang kosong dalam campuran beton, meningkatkan densitas dan kohesi material. Kedua, reaktivitas serbuk kaca dengan matriks semen dapat membentuk produk hidrasi tambahan yang mengisi pori-pori beton dan meningkatkan ikatan antar partikel. Namun, temuan yang menarik terjadi pada variasi penggantian serbuk kaca sebesar 15%. Dalam kasus ini, penggunaan substitusi serbuk kaca 15% mengakibatkan penurunan kuat tekan di bawah benda uji kontrol. Penurunan ini mungkin disebabkan oleh beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan. Pertama, penggantian yang tinggi dapat mengganggu distribusi partikel dalam campuran, menyebabkan heterogenitas dan ketidaksempurnaan struktur beton. Kedua, serbuk kaca dengan persentase penggantian yang tinggi dapat mempengaruhi proporsi air-semen dalam campuran, mempengaruhi reaktivitas hidrasi dan kekuatan akhir beton. Pada tahap awal pengembangan beton SCC, penting untuk memperhatikan perbedaan kinerja pada umur 1 hari. Kuat tekan pada umur ini memberikan indikasi awal tentang potensi kekuatan beton pada umur yang lebih matang. Namun, perlu diperhatikan bahwa kuat tekan pada umur 1 hari bukanlah satu-satunya parameter yang harus diperhatikan. Evaluasi yang lebih komprehensif terhadap berbagai parameter, seperti kuat tekan pada umur yang lebih lanjut, daya tahan, dan sifat mekanik lainnya, perlu dilakukan untuk mendapatkan gambaran yang lebih lengkap tentang kinerja beton SCC dengan substitusi serbuk kaca.

Flowability Beton Segar

Penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi dalam beton self-compacting (SCC) telah menjadi fokus penelitian yang menarik dalam beberapa tahun terakhir. Dalam analisis ini, penulis menginvestigasi efek penggunaan serbuk kaca dengan variasi persentase 0%, 5%, 10%, dan 15% dari substitusi binder terhadap flowability, yaitu kemampuan aliran dari beton SCC. Penemuan menunjukkan bahwa terdapat peningkatan flowability yang meningkat secara linear seiring dengan peningkatan persentase substitusi serbuk kaca pada binder beton SCC. *Flowability* merupakan salah satu karakteristik krusial dalam beton SCC. Kemampuan beton untuk mengalir dengan leluasa dan mengisi ruang kosong dalam cetakan secara optimal merupakan faktor yang sangat penting untuk mencapai kualitas dan performa yang baik. Dalam hal ini, penggunaan serbuk kaca sebagai substitusi telah terbukti efektif dalam meningkatkan *flowability* beton SCC. Pada variasi 0% substitusi serbuk kaca, beton SCC berperilaku seperti beton SCC konvensional tanpa adanya penambahan serbuk kaca. Namun, saat dilakukan substitusi serbuk kaca sebesar 5%, 10%, dan 15% dari substitusi binder, *flowability* beton SCC secara konsisten meningkat sejalan dengan meningkatnya persentase substitusi serbuk kaca.

Penyebab dari peningkatan flowability ini dapat dijelaskan melalui beberapa faktor. Pertama, serbuk kaca memiliki sifat fisik yang halus dan tidak reaktif, sehingga partikel-partikelnya mampu melumasi satu sama lain dan permukaan agregat dalam campuran beton. Hal ini mengurangi gesekan antar partikel dan memudahkan aliran yang lancar. Selain itu, serbuk kaca juga dapat mempengaruhi reologi campuran beton SCC dengan mengurangi viskositas dan meningkatkan deformabilitas, sehingga memungkinkan beton untuk mengalir lebih baik. Peningkatan flowability yang meningkat secara linear seiring dengan peningkatan persentase substitusi serbuk kaca juga menunjukkan bahwa efek substitusi serbuk kaca terhadap sifat aliran beton SCC bersifat proporsional. Dalam hal ini, semakin tinggi jumlah serbuk kaca yang ditambahkan ke dalam campuran beton SCC, semakin meningkat pula kemampuan aliran beton tersebut. Meskipun peningkatan flowability yang linear terlihat sebagai keuntungan yang signifikan dari penggunaan substitusi serbuk kaca dalam beton SCC, perlu dicatat bahwa evaluasi yang lebih komprehensif terhadap sifat mekanik, ketahanan, dan karakteristik lainnya dari beton SCC dengan substitusi serbuk kaca juga perlu dilakukan. Selain itu, aspek ekonomi dan keberlanjutan dari penggunaan serbuk kaca sebagai pengganti binder dalam beton SCC juga perlu dipertimbangkan secara mendalam.

4. KESIMPULAN

Dalam kesimpulan, penggunaan substitusi serbuk kaca dengan variasi 10% dari berat binder dapat meningkatkan kuat tekan beton SCC pada umur 1 hari dibandingkan dengan variasi 0%, 5% dan 15%. Namun, penggunaan substitusi serbuk kaca sebesar 15% menghasilkan penurunan kuat tekan di bawah benda uji kontrol. Untuk evaluasi yang lebih mendalam, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk memahami faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan kinerja beton SCC dengan penggantian serbuk kaca dalam jangka waktu yang lebih lama dan untuk memperoleh informasi yang lebih komprehensif tentang karakteristik beton SCC yang disempurnakan dengan serbuk kaca.

Selain itu, penggunaan substitusi serbuk kaca dengan variasi persentase 0%, 5%, 10%, dan 15% dari substitusi binder menghasilkan peningkatan flowability yang meningkat secara linear seiring dengan meningkatnya persentase substitusi serbuk kaca pada binder beton SCC. Hal ini menunjukkan bahwa substitusi serbuk kaca dapat menjadi pilihan efektif untuk meningkatkan kemampuan aliran beton SCC, dengan potensi untuk memberikan keuntungan dalam proses produksi dan aplikasi struktur beton SCC. Namun, diperlukan evaluasi yang komprehensif dan analisis yang lebih mendalam untuk memahami dengan lebih baik dampak penggunaan substitusi serbuk kaca dalam beton SCC.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. G. Richardson, *Fundamentals of durable reinforced concrete*, 1st ed. New York: Spon Press, 2022.
- [2] A. Bouikni, R. N. Swamy, and A. Bali, "Durability properties of concrete containing 50% and 65% slag," *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 8, pp. 2836–2845, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.02.040.
- [3] T. Ayub, N. Shafiq, and S. U. Khan, "Durability of Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review," *International Journal of Civil Science and Engineering*, vol. 7, no. 8, pp. 1161–1172, 2013, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/279527294>
- [4] K. Ramakrishnan, G. Pugazhmani, R. Sripragadeesh, D. Muthu, and C. Venkatasubramanian, "Experimental study on the mechanical and durability properties of concrete with waste glass

- powder and ground granulated blast furnace slag as supplementary cementitious materials,” *Constr Build Mater*, vol. 156, pp. 739–749, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.183.
- [5] P. Chindaprasirt, C. Chotithanorm, H. T. Cao, and V. Sirivivatnanon, “Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 21, no. 2, pp. 356–361, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.010.
 - [6] M. Thomas, “The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review,” *Cem Concr Res*, vol. 41, no. 12, pp. 1224–1231, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.11.003.
 - [7] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd Elmoaty, and A. Y. Aboshama, “Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 124, pp. 866–877, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016.
 - [8] N. Schwarz and N. Neithalath, “Influence of a fine glass powder on cement hydration: Comparison to fly ash and modeling the degree of hydration,” *Cem Concr Res*, vol. 38, no. 4, pp. 429–436, Apr. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.12.001.
 - [9] Z. Chen, Y. Wang, S. Liao, and Y. Huang, “Grinding kinetics of waste glass powder and its composite effect as pozzolanic admixture in cement concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 239, p. 117876, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117876.
 - [10] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, and D. Rodriguez, “Studies on concrete containing ground waste glass,” *Cem Concr Res*, vol. 30, no. 1, pp. 91–100, Jan. 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00213-6.
 - [11] A. M. Matos and J. Sousa-Coutinho, “Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement,” *Constr Build Mater*, vol. 36, pp. 205–215, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027.
 - [12] I. M. Metwally, “Investigations on the Performance of Concrete Made with Blended Finely Milled Waste Glass,” *Advances in Structural Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 47–53, Feb. 2007, doi: 10.1260/136943307780150823.
 - [13] C. Shi, Y. Wu, C. Riefler, and H. Wang, “Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders,” *Cem Concr Res*, vol. 35, no. 5, pp. 987–993, May 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.015.
 - [14] A. Rahma, N. El Naber, and S. Issa Ismail, “Effect of glass powder on the compression strength and the workability of concrete,” *Cogent Eng*, vol. 4, no. 1, p. 1373415, Jan. 2017, doi: 10.1080/23311916.2017.1373415.
 - [15] A. Shayan and A. Xu, “Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs,” *Cem Concr Res*, vol. 36, no. 3, pp. 457–468, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.12.012.