

Studi Komparasi Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton *Self-Compacting Concrete* dengan Substitusi *Fly Ash* dan *Silica Fume*

Anandha Risal Ariyanto^{1*}, Ahmad Nur Syariffudin², Antonius³

¹⁻³ Universitas Islam Sultan Agung Semarang, Indonesia

email: anandharisaal01@gmail.com¹

Article Info :

Received:
06-01-2026
Revised:
11-02-2026
Accepted:
20-02-2026

Abstract

Self-Compacting Concrete (SCC) is an innovative concrete that can flow and compact itself without a compactor, making it highly effective for use in structures with dense reinforcement and complex shapes. However, the high cement requirements of SCC increase costs and carbon emissions, necessitating alternatives in the form of pozzolanic material substitutions such as fly ash and silica fume. This study aimed to analyze the effect of these two materials on the compressive and splitting tensile strength of SCC concrete through experimental methods with substitution variations of 0%, 10%, and 15% of the cement weight, as well as testing of fresh properties according to standards. The results showed that pozzolanic material substitution improved the mechanical performance of SCC, but to varying degrees. The addition of 10% fly ash only provided a moderate increase in compressive strength of approximately 4% at 28 days and had no significant effect on splitting tensile strength. On the other hand, 10% silica fume proved to be the most optimal composition because it produced the highest compressive strength of 57.49 MPa (an increase of about 28% from normal concrete) and increased the splitting tensile strength to 3.58 MPa, making it more effective for high-quality SCC.

Keywords: *Fly Ash, Compressive Strength, Split Tensile Strength, Self-Compacting Concrete, Silica Fume.*

Abstrak

Self-Compacting Concrete (SCC) merupakan beton inovatif yang dapat mengalir dan memadat sendiri tanpa alat pemadat, sehingga sangat efektif digunakan pada struktur dengan tulangan rapat dan bentuk kompleks. Namun, kebutuhan semen yang tinggi pada SCC meningkatkan biaya dan emisi karbon, sehingga diperlukan alternatif berupa substitusi material pozolanik seperti fly ash dan silica fume. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kedua material tersebut terhadap kuat tekan dan kuat tarik belah beton SCC melalui metode eksperimen dengan variasi substitusi 0%, 10%, dan 15% dari berat semen, serta pengujian sifat segar sesuai standar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa substitusi material pozolanik mampu meningkatkan kinerja mekanik SCC, tetapi dengan tingkat pengaruh yang berbeda. Fly ash 10% hanya memberikan peningkatan kuat tekan moderat sekitar 4% pada umur 28 hari dan tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tarik belah. Sebaliknya, silica fume 10% terbukti sebagai komposisi paling optimal karena menghasilkan kuat tekan tertinggi 57,49 MPa (meningkat sekitar 28% dari beton normal) serta meningkatkan kuat tarik belah menjadi 3,58 MPa, sehingga lebih efektif untuk SCC mutu tinggi.

Kata kunci: *Fly Ash, Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, Self-Compacting Concrete, Silica Fume.*



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Perkembangan konstruksi modern menuntut material beton yang tidak hanya memiliki kuat tekan tinggi tetapi juga kemampuan aliran dan pemadatan optimal untuk memenuhi kebutuhan proyek berskala besar dan kompleks. Secara global, tren inovasi material beton menekankan pada efisiensi, durabilitas, dan keberlanjutan, dengan Self-Compacting Concrete (SCC) muncul sebagai solusi unggulan karena kemampuan alirannya yang mandiri tanpa vibrator serta kemampuan mengisi cetakan dengan tulangan rapat. Penelitian mutakhir menyoroti bahwa integrasi bahan tambah seperti fly ash dan silica fume dapat menurunkan intensitas penggunaan semen Portland sekaligus meningkatkan kinerja mekanik dan durabilitas beton, sehingga sejalan dengan target global pengurangan emisi karbon pada sektor konstruksi dan peningkatan ketahanan struktur terhadap lingkungan agresif (Iskandar et al., 2005; Ihza Mahendra et al., 2023; Davendra, 2022).

Kajian empiris terdahulu menegaskan kontribusi signifikan fly ash dan silica fume terhadap sifat mekanik beton SCC. Fly ash sebagai bahan pozzolanik dapat bereaksi dengan kapur bebas untuk membentuk C-S-H sekunder, meningkatkan kepadatan matriks dan menurunkan permeabilitas, sementara silica fume memberikan kontribusi terhadap peningkatan kuat tekan awal dan akhir serta mengurangi porositas mikro (Ekasanti et al., 2022; Fernando et al., 2024). Sintesis hasil penelitian juga mengindikasikan bahwa kombinasi fly ash dan silica fume pada beton High Volume Fly Ash-SCC (HVFA-SCC) mampu mencapai kuat tekan >50 MPa pada umur 28 hari, menurunkan penyerapan air, dan meningkatkan daya tahan beton terhadap serangan kimia dan abrasi (Kurniadi & Kurniawan, 2022; Miling et al., 2024). Penemuan ini menunjukkan potensi optimalisasi campuran beton SCC untuk proyek konstruksi modern yang menuntut efisiensi waktu dan mutu tinggi, sekaligus memanfaatkan limbah industri secara berkelanjutan.

Meskipun banyak penelitian telah menyoroti efek individual fly ash atau silica fume terhadap kekuatan beton, terdapat ketidakkonsistenan dalam data mengenai pengaruh kombinasi kedua bahan terhadap perkembangan kuat tekan dan kuat tarik pada berbagai umur pengerasan. Beberapa studi melaporkan peningkatan signifikan pada kuat tekan tetapi tidak pada kuat tarik, sementara yang lain menunjukkan sensitivitas tinggi terhadap persentase substitusi dan kondisi curing (Siahaan et al., 2025; Wagola et al., 2020). Kekosongan empiris ini memperlihatkan keterbatasan pemahaman terkait interaksi mikrostruktur beton SCC ketika kedua bahan pozzolanik digunakan secara simultan, sehingga memunculkan celah konseptual dalam perancangan campuran beton berperforma tinggi yang dapat diterapkan secara konsisten di lapangan.

Urgensi ilmiah dari permasalahan ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk menghasilkan data empiris yang valid mengenai pengaruh substitusi fly ash dan silica fume terhadap sifat mekanik beton SCC, terutama dalam konteks proyek infrastruktur yang menuntut kualitas permukaan optimal, ketahanan terhadap lingkungan agresif, dan efisiensi pengerjaan. Secara praktis, industri konstruksi menghadapi tantangan biaya tinggi dan dampak lingkungan dari penggunaan semen Portland yang berlebihan, sehingga pengembangan campuran beton SCC berbasis substitusi material tambahan menjadi strategi penting untuk memenuhi standar kinerja tinggi sekaligus mendukung keberlanjutan (Suryani et al., 2018; Novitasari & Budiprasetyo, 2024).

Posisi penelitian ini ditempatkan pada perbatasan antara inovasi material dan optimasi kinerja beton SCC. Penelitian ini berfokus pada analisis komparatif kuat tekan dan kuat tarik pada umur 7 dan 28 hari, dengan memanfaatkan kombinasi fly ash dan silica fume sebagai substitusi sebagian semen, sehingga mengisi celah empiris yang ada serta menambah pemahaman mengenai interaksi bahan tambah dalam matriks SCC. Penekanan diberikan pada pengukuran parameter mekanik yang relevan untuk aplikasi praktis di lapangan, sekaligus memberikan insight yang dapat dijadikan acuan dalam perancangan campuran beton ramah lingkungan, ekonomis, dan berkinerja tinggi.

Penelitian ini bertujuan untuk menyediakan data empiris komprehensif yang dapat menjadi dasar bagi industri konstruksi dan akademisi dalam mengembangkan beton SCC dengan kualitas unggul, efisiensi pengerjaan tinggi, dan ketahanan optimal. Secara teoretis, penelitian diharapkan memperkaya literatur tentang mekanisme interaksi fly ash dan silica fume pada matriks beton, sementara secara metodologis menawarkan pendekatan sistematis untuk evaluasi kuat tekan dan kuat tarik pada berbagai umur, sehingga berkontribusi pada pengembangan standar beton berkelanjutan di Indonesia dan memperkuat landasan ilmiah untuk aplikasi praktis dalam proyek-proyek infrastruktur modern.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi eksperimen empiris yang dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA), Semarang, pada periode November 2025 hingga Januari 2026. Arsitektur sistem penelitian mencakup pengujian sifat segar dan keras beton Self-Compacting Concrete (SCC) dengan substitusi fly ash dan silica fume sebagai pengganti sebagian semen. Bahan yang digunakan meliputi semen Portland, agregat kasar, agregat halus, air, fly ash, silica fume, dan superplasticizer. Peralatan laboratorium meliputi slump flow apparatus, V-funnel, L-box, cetakan silinder dan kubus, serta mesin uji tekan dan tarik sesuai standar SNI 1973:2011 dan SNI 1974:2011. Tahap implementasi meliputi pengujian material penyusun, perancangan campuran (mix design) beton SCC, pembuatan dan pemadatan benda uji, serta curing hingga umur tertentu (7 dan 28 hari). Setiap campuran disiapkan dengan variasi persentase fly ash dan silica fume untuk mengevaluasi efek kombinasi bahan tambah terhadap kinerja mekanik beton.

Prosedur pengujian dimulai dengan evaluasi sifat segar beton melalui slump flow test, T50 test, V-funnel test, dan L-box test untuk memastikan workability dan kemampuan alir yang optimal. Selanjutnya, benda uji beton yang telah di-curing diuji untuk kuat tekan dan kuat tarik belah menggunakan mesin uji universal sesuai standar. Validasi data dilakukan melalui replikasi setiap pengujian untuk memastikan reproduktifitas dan keakuratan hasil, dengan perhitungan statistik deskriptif dan analisis perbandingan antar variasi campuran. Metrik evaluasi kinerja beton mencakup nilai kuat tekan (MPa) dan kuat tarik belah (MPa) pada umur 7 dan 28 hari, yang digunakan untuk menentukan pengaruh substitusi fly ash dan silica fume terhadap kekuatan awal dan akhir beton SCC, sekaligus menilai efektivitas kombinasi bahan tambah dalam meningkatkan durabilitas dan stabilitas mekanik material.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan diawali dengan pengujian sifat fisik material penyusun beton, meliputi semen Portland tipe I, agregat halus, agregat kasar, fly ash, silica fume, air, serta Sika ViscoCrete 3115 N. Selanjutnya dilakukan perencanaan campuran beton SCC menggunakan metode mix design yang dimodifikasi berdasarkan ACI dan Iskandar (2005), dilanjutkan dengan perhitungan kebutuhan bahan per m³ dan per benda uji silinder berukuran 150 mm × 300 mm untuk setiap variasi substitusi fly ash 0%, 10%, 15% dan silica fume 0%, 10%, 15%. Setelah rancangan campuran ditetapkan, beton dicampur dan dicetak menjadi benda uji, kemudian dilakukan perawatan (curing) hingga umur rencana, sebelum akhirnya diuji sifat segar menggunakan slump flow, T-50, L-box, dan V-funnel, serta diuji sifat mekanik berupa kuat tekan dan kuat tarik belah pada umur 7 dan 28 hari. Data yang diperoleh dari hasil pengujian selanjutnya diolah dan dianalisis menggunakan metode deskriptif dan komparatif guna mengetahui pengaruh substitusi fly ash dan silica fume terhadap karakteristik beton SCC, baik pada kondisi segar maupun kondisi keras.

Pemeriksaan Kadar Lumpur Pada Agregat Kasar

Berdasarkan hasil pemeriksaan, nilai rata-rata kadar lumpur agregat kasar yang digunakan sebagai bahan campuran beton dalam penelitian ini diperoleh sebesar 3%.

Tabel 1. Hasil Pemeriksaan Kadar Lumpur dengan Cara Cucian

No	Massa Wadah	Massa Wadah + Agregat Sebelum Dilakukan Pencucian	Massa Wadah + Agregat Setelah Dilakukan Oven	Kadar Lumpur (%)	Rata – Rata Kadar Lumpur (%)
1	53	553	535	3	3
2	54	554	536	3	

Berdasarkan data yang diperoleh dari percobaan pertama dan kedua, kadar lumpur median yang dihasilkan sebesar 3%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar perlu melalui proses pembersihan terlebih dahulu karena kandungan lumpurnya masih melebihi batas 1% berdasarkan berat kering. Agregat kasar yang digunakan dalam penelitian ini tidak dapat langsung dimanfaatkan dalam campuran beton sesuai dengan persyaratan SK SNI S-04-1989-F.

Pemeriksaan Kadar Air Pada Agregat Kasar

Berdasarkan hasil pemeriksaan, diperoleh nilai rata-rata kadar air agregat kasar yang digunakan sebagai komponen campuran beton dalam penelitian ini sebesar 3,5 %.

Tabel 1. Hasil Uji Kadar Air Agregat Kasar dengan Cara Dioven

No	Massa Wadah	Massa Wadah + Agregat Sebelum	Massa Wadah + Agregat Setelah	Kadar Air (%)	Rata – Rata Kadar Air (%)
----	-------------	-------------------------------	-------------------------------	---------------	---------------------------

		Dilakukan Oven	Dilakukan Oven		
1	42	542	539	6	
2	44	544	536	1	3,5

Berdasarkan hasil percobaan pertama dan kedua, diperoleh nilai kadar air rata-rata sebesar 3,5 %. Hasil tersebut menunjukkan bahwa agregat kasar tidak perlu dikeringkan terlebih dahulu karena kadar airnya masih berada di bawah batas 5% berdasarkan berat kering. Dengan demikian, agregat kasar dapat langsung digunakan dalam campuran beton sesuai ketentuan SK SNI S-04-1989-F.

Analisis Pemisah Saringan Pada Agregat Kasar

Tabel 3. Hasil Pemeriksaan Pemisahan Saringan Agregat Kasar

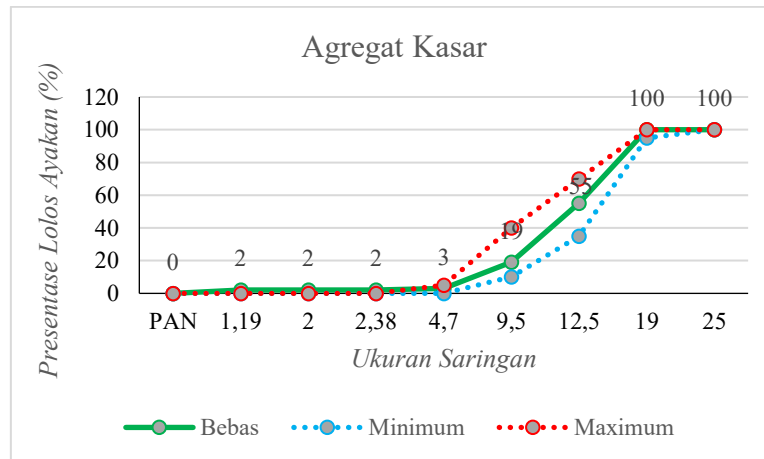
No	ØUkuran Saringan (mm)	Berat Cawan (g) (a)	Berat Cawan + Agregat (g) (b)	Berat Agregat (g) (c)
1	25	-	-	-
2	19	-	-	-
3	12,5	44	270	226
4	9,5	44	222	178
5	4,7	44	123	79
6	2,38	44	49	5
7	2	44	44	0
8	1,19	-	-	-
9	PAN	44	56	12
JUMLAH				500

Tabel 4. Hasil Perhitungan Dari Pengujian Saringan Pada Agregat Kasar

No	ØUkuran Saringan (mm)	Berat Agregat (g)	Persentase Agregat Yang Tertahan (%)	Akumulasi Agregat Yang Tertahan (%)	Persentase Lolos Ayakan (%)	ASTM C33	
						MIN (%)	MAX (%)
1	25	0	0	0	100	100	100
2	19	0	0	0	100	95	100
3	12,5	226	45	45	55	35	70
4	9,5	178	36	81	19	10	40
5	4,7	79	16	97	3	0	5
6	2,38	5	1	98	2	.	0
7	2	0	0	98	2	-	-
8	1,19	0	0	98	2	-	-
9	PAN	12	2	100	0	-	-
JUMLAH		500	100	617	283	-	-

$$\begin{aligned}
 \text{MHB} &= \frac{\sum \% \text{Komulatif Agregat Tertinggal}}{100} \\
 &= \frac{617}{100} \\
 &= 6,17
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan analisis saringan agregat kasar pada persamaan tersebut, diperoleh nilai Modulus Halus Butir sebesar 6,2. Nilai ini menunjukkan bahwa agregat memiliki ukuran partikel yang relatif besar dan telah memenuhi kriteria agregat kasar menurut SNI (5–8Agregat tersebut sesuai dengan ketentuan dan persyaratan SNI 03-2834-2000.



Gambar 1. Diagram Hasil Pengujian Saringan Agregat Kasar

Pemeriksaan Kadar Lumpur Pada Agregat Halus

Berdasarkan hasil pemeriksaan, diperoleh nilai rata-rata kadar lumpur agregat halus yang digunakan sebagai komponen campuran beton dalam penelitian ini sebesar 5%.

Tabel 5. Hasil Pemeriksaan Kadar Lumpur Dengan Cara Endapan

No	Volume Agregat Halus (V1)	Jumlah Lumpur (V2)	Kadar Lumpur (%)	Rata – Rata (%)
1	500 ml	25 ml	4,7	5
2	500 ml	28 ml	5,3	

Berdasarkan hasil percobaan pertama dan kedua, diperoleh nilai kadar lumpur median sebesar 5%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa agregat halus tidak memerlukan proses pembersihan terlebih dahulu karena kandungan lumpurnya masih berada pada batas maksimum yaitu 5%. Agregat halus dapat langsung digunakan dalam campuran beton sesuai ketentuan SK SNI S-04-1989-F.

Pemeriksaan Kadar Air Pada Agregat Halus

Data median kadar air bisa diamati pada pemeriksaan tersebut menunjukkan hasil dari nilai kadar air agregat halus yang dimanfaatkan sebagai komponen campuran beton dalam penelitian ini sebesar 5,7%.

Tabel 6. Hasil Uji Kadar Air Agregat Halus Dengan Cara Dioven

No	Massa Wadah	Massa Wadah + Agregat Sebelum Dilakukan Oven	Massa Wadah + Agregat Setelah Dilakukan Oven	Kadar Air (%)	Rata – Rata Kadar Air (%)
1	34	534	503	6,2	5,7
2	35	535	509	5,2	

Berdasarkan data hasil percobaan pertama dan kedua, diperoleh nilai kadar air rata-rata sebesar 5,7%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa agregat halus perlu dikeringkan terlebih dahulu karena kadar airnya masih melebihi batas 5% berdasarkan berat kering. Dengan demikian, agregat halus tidak dapat langsung digunakan dalam campuran beton sesuai ketentuan SK SNI S-04-1989-F.

Analisis Pemisah Saringan Pada Agregat Halus

Tabel 7. Hasil Pemeriksaan Pemisahan Saringan Agregat Hasil

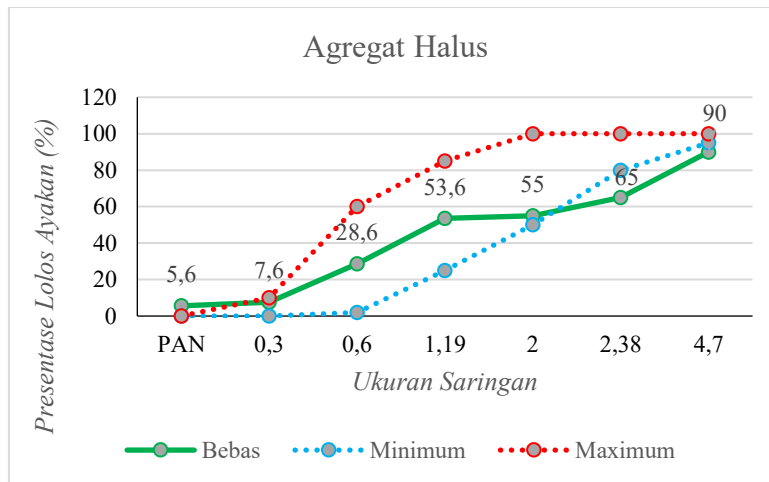
No	ØUkuran Saringan (mm)	Berat Cawan (g) (a)	Berat Cawan + Agregat (g) (b)	Berat Agregat (g) (c)
1	4,7	44	96	52
2	2,38	44	171	127
3	2	44	95	51
4	1,19	44	51	7
5	0,6	44	168	124
6	0,3	44	149	105
7	PAN	44	54	10
		JUMLAH		476

Tabel 8. Hasil Perhitungan Dari Pengujian Saringan Pada Agregat Halus

No	ØUkuran Saringan (mm)	Berat Agregat (g)	Persentase Agregat Yang Tertahan (%)	Akumulasi Agregat Yang Tertahan (%)	Persentase Lolos Ayakan (%)	ASTM C33	
						MIN (%)	MAX (%)
1	4,7	52	10	10	90	95	100
2	2,38	127	25	35	65	80	100
3	2	51	10	45	55	50	100
4	1,19	7	1,4	46,4	53,6	25	85
5	0,6	124	25	71,4	28,6	2	60
6	0,3	105	21	92,4	7,6	0	10
7	PAN	10	2	94,4	5,6	-	-
JUMLAH		476	94,4	394,6	305,4	-	-

$$\begin{aligned}
 \text{MHB} &= \frac{\sum \% \text{Komulatif Agregat Tertinggal}}{100} \\
 &= \frac{394,6}{100} \\
 &= 3,94
 \end{aligned}$$

Hasil dan Hitungan Saringan Agregat Halus pada persamaan diatas didapatkan Nilai Modulus Halus Butir Sebesar 3,9. Yang menunjukkan bahwa agregat tersebut memiliki butir yang besar dan tidak memenuhi kriteria SNI, bahwa untuk batasan ukuran agregat halus berjumlah sebesar (1,5 - 3,8). Berdasarkan ketentuan dan persyaratan SNI 03-2834-2000.



Gambar 2. Diagram Hasil Pengujian Saringan Agregat Halus

Hasil Pengujian Sifat Segar Beton SCC

Table A.6 – Conformity criteria for the properties of SCC	
Property	Criteria
Slump-flow class SF1	$\geq 520\text{mm}$, $\leq 700\text{mm}$
Slump-flow class SF2	$\geq 640\text{mm}$, $\leq 800\text{mm}$
Slump-flow class SF3	$\geq 740\text{mm}$, $\leq 900\text{mm}$
Slump-flow class specified as a target value	$\pm 80\text{mm}$ of target value
V-funnel class VF1	$\leq 10\text{s}$
V-funnel class VF2	$\geq 7\text{s}$, $\leq 27\text{s}$
V-funnel specified as a target value	$\pm 3\text{s}$
L-box class PA1	$\geq 0,75$
L-box class PA2	$\geq 0,75$
L-box specified as a target value	Not more than 0,05 below the target value

Gambar 3. Kriteria Hasil Pengujian Beton SCC
(Sumber : EFNARC)

Hasil Uji Slump Flow Pada Beton Segar Substitusi Fly Ash

Hasil uji slump flow pada beton SCC dengan penambahan fly ash sebesar 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 730 mm, 750 mm, dan 570 mm. Dengan demikian, hasil uji slump flow pada campuran SCC dengan substitusi fly ash menunjukkan bahwa variasi 0% dan 10% telah memenuhi kriteria beton memadat sendiri, karena nilai diameter sebar yang dihasilkan berada pada kisaran 640–800 mm sesuai ketentuan EFNARC. Pada campuran dengan fly ash sebesar 15%, nilai slump flow yang diperoleh yaitu 570 mm berada di bawah batas minimum 640 mm sehingga tidak memenuhi persyaratan SCC.

Tabel 9. Hasil Uji *Slump Flow* Pada Beton Campuran *Fly Ash*

No	Kode	Hasil <i>Slump Flow</i> (mm)	EFNARC	
			MIN	MAX
1	S.N	730		
2	S.FA.10	750	640 mm	800 mm
3	S.FA.15	570		

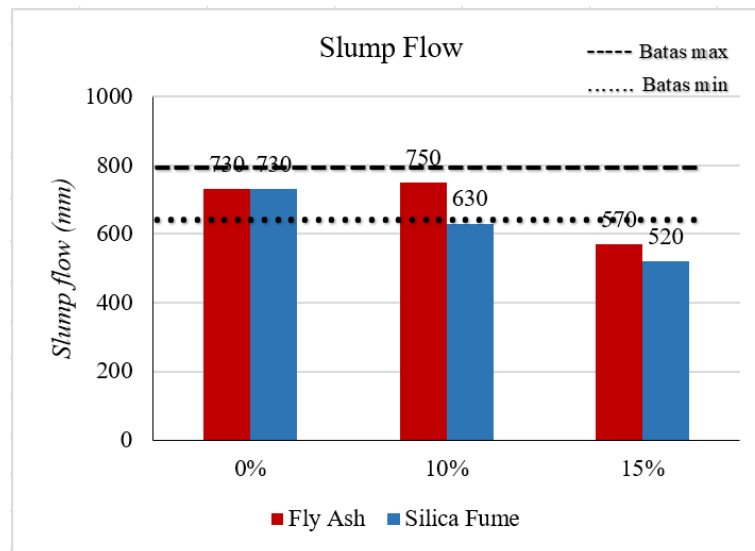
Hasil uji slump flow Pada Beton Segar Substitusi Silica Fume

Hasil uji slump flow pada beton SCC dengan penambahan silica fume sebesar 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 730 mm, 630 mm, dan 520 mm. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa campuran SCC dengan substitusi silica fume 0% dan 10% masih memenuhi kriteria beton memadat sendiri sesuai ketentuan EFNARC. Kemudian pada campuran dengan silica

fume sebesar 15%, nilai slump flow sebesar 520 mm berada di bawah batas minimum 640 mm sehingga tidak memenuhi persyaratan SCC. Jika dibandingkan, pada kadar 10% campuran fly ash mencapai nilai slump flow 750 mm, sedangkan campuran silica fume hanya 630 mm, yang menunjukkan bahwa pada kadar yang sama, fly ash cenderung lebih meningkatkan kemampuan alir dibandingkan silica fume yang partikelnya jauh lebih halus dan lebih banyak menyerap air. Pada kadar 15%, penurunan nilai slump flow terjadi pada kedua jenis campuran, namun campuran fly ash masih berada pada 570 mm, sedangkan campuran silica fume turun lebih jauh hingga 520 mm.

Tabel 10. Hasil Uji Slump Flow Pada Beton Campuran Silica Fume

No	Kode	Hasil Slump Flow (mm)	EFNARC	
			MIN	MAX
1	N	730		
2	S.SF.10	630	640 mm	800 mm
3	S.SF.15	520		



Gambar 4. Diagram Perbandingan Slump Flow

Hasil T-50 Pada Beton Segar Substitusi Fly Ash

Hasil pengujian T-50 dari beton SCC dengan campuran fly ash variasi 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 3,43 detik, 6,11 detik, dan 6,15 detik, yang dapat dilihat pada Tabel 4.11. Menurut kriteria EFNARC, waktu T-50 yang ideal untuk beton SCC berada dalam rentang 2–5 detik guna menunjukkan kecepatan alir yang optimal tanpa segregasi berlebih. Dari hasil tersebut, hanya variasi fly ash 0% (3,43 detik) yang memenuhi persyaratan EFNARC karena berada dalam batas waktu yang ditetapkan, sedangkan variasi 10% dan 15% (6,11 detik dan 6,15 detik) tidak memenuhi syarat karena melebihi batas maksimum 5 detik.

Tabel 11. Hasil Uji T-50 Pada Beton Campuran Fly Ash

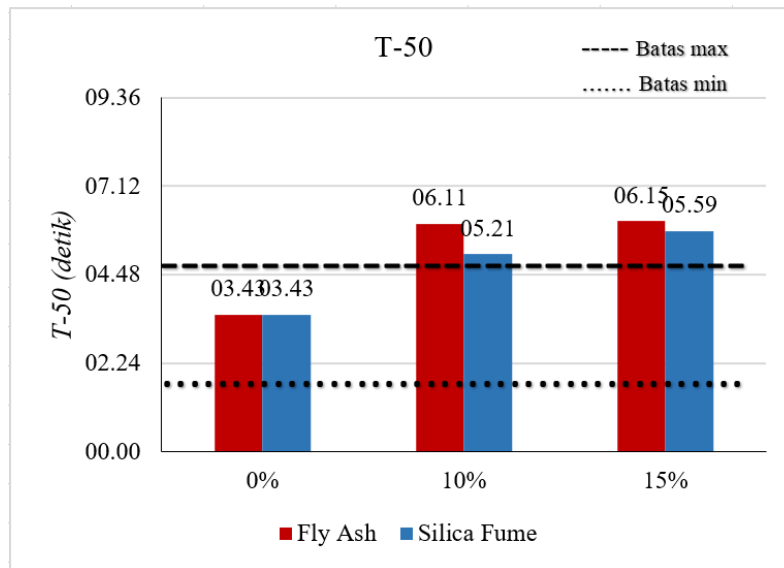
No	Kode	Hasil T-50 (detik)	EFNARC	
			MIN	MAX
1	N	3.43		
2	T.FA.10	6.11	2 detik	5 detik
3	T.FA.15	6.15		

Hasil pengujian T-50 dari beton SCC dengan campuran silica fume variasi 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 3,43 detik, 5,21 detik, dan 5,59 detik, yang dapat dilihat pada

Tabel 4.12. Dari hasil tersebut, variasi silica fume 0% (3,43 detik) dan 10% (5,21 detik) memenuhi persyaratan EFNARC karena berada dalam batas waktu yang ditetapkan, sedangkan variasi 15% (5,59 detik) tidak memenuhi syarat karena melebihi batas maksimum 5 detik.

Tabel 12. Hasil Uji T-50 Pada Beton Campuran Silica Fume

No	Kode	Hasil T-50 (detik)	EFNARC	
			MIN	MAX
1	N	3.43		
2	T.SF.10	5.21	2 detik	5 detik
3	T.SF.15	5.59		



Gambar 5. Diagram Perbandingan T-50

Hasil L-Box Pada Beton Segar Substitusi Fly Ash

Hasil pengujian L-box dari beton SCC dengan campuran fly ash variasi 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 0,96, 0,92, dan 0,80, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.13. Berdasarkan hasil tersebut, seluruh variasi campuran fly ash, baik 0%, 10%, maupun 15%, memenuhi persyaratan EFNARC karena nilai H2/H1 yang diperoleh masih berada dalam batas yang ditetapkan.

Tabel 13. Hasil Uji L-Box Pada Beton Campuran Fly Ash

No	Kode	Hasil L-Box	EFNARC	
			MIN	MAX
1	N	0,96		
2	L.FA.10	0,92	0,75	1,0
3	L.FA.15	0,80		

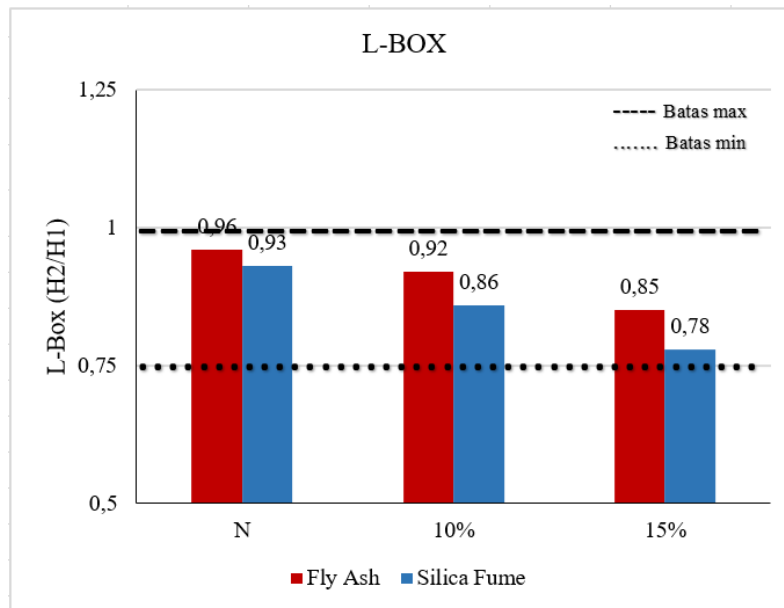
Hasil L-Box Pada Beton Segar Substitusi Silica Fume

Hasil pengujian L-box dari beton SCC dengan campuran silica fume variasi 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 0,96, 0,86, dan 0,78, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.14. Berdasarkan hasil tersebut, seluruh variasi campuran fly ash, baik 0%, 10%, maupun 15%, memenuhi persyaratan EFNARC karena nilai H2/H1 yang diperoleh masih berada dalam batas yang ditetapkan.

Tabel 14. Hasil Uji L-Box Pada Beton Campuran Silica Fume

No	Kode	Hasil L-Box	EFNARC	
			MIN	MAX

1	N	0,96		
2	L.SF.10	0,86	0,75	1,0
3	L.SF.15	0,78		



Gambar 6. Diagram Perbandingan L-Box

Hasil V-Funnel Pada Beton Segar Substitusi Fly Ash

Hasil pengujian V-funnel dari beton SCC dengan campuran fly ash variasi 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 08,38 detik, 10,46 detik, dan 13,11 detik, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.15. Menurut kriteria EFNARC, waktu alir V-funnel yang ideal untuk beton SCC berada dalam rentang 7–27 detik guna menunjukkan viskositas dan segregation resistance yang optimal. Variasi fly ash 0%, 10%, dan 15% sudah memenuhi persyaratan EFNARC karena berada dalam batas waktu yang ditetapkan.

Tabel 15. Hasil Uji *V-Funnel* Pada Beton Campuran *Fly Ash*

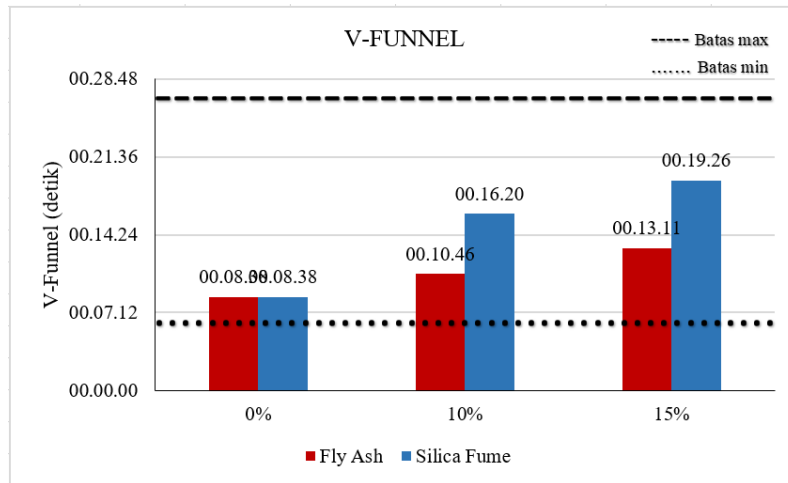
No	Kode	Hasil <i>V-Funnel</i> (detik)	EFNARC	
			MIN	MAX
1	N	08.38		
2	V.FA.10	10.46	7 detik	27 detik
3	V.FA.15	13.11		

Hasil V-Funnel Pada Beton Segar Substitusi Silica Fume

Hasil pengujian V-funnel dari beton SCC dengan campuran silica fume variasi 0%, 10%, dan 15% secara berturut-turut menunjukkan nilai 8,38 detik, 16,20 detik, dan 19,26 detik, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.16. Berdasarkan hasil tersebut, variasi silica fume 0%, 10%, dan 15% sudah memenuhi persyaratan EFNARC karena berada dalam batas waktu yang ditetapkan.

Tabel 16. Hasil Uji *V-Funnel* Pada Beton Campuran *Silica Fume*

No	Kode	Hasil <i>V-Funnel</i> (detik)	EFNARC	
			MIN	MAX
1	N	08.38		
2	V.SF.10	16.20	7 detik	27 detik
3	V.SF.15	19.26		



Gambar 7. Diagram Perbandingan V-Funnel

Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Beton Substitusi Fly Ash

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan beton substitusi fly ash pada umur 7 hari mendapatkan hasil optimum pada variasi 10% dengan hasil kuat tekan 29,907 Mpa dimana hasil tersebut mengalami kenaikan 4% dari beton normal pada umur 7 hari yang memiliki hasil kuat tekan 27,963MPa. Kemudian substitusi fly ash pada umur 28 hari dengan variasi 10% merupakan hasil optimum dengan hasil kuat tekan 37,626 Mpa, dimana hasil tersebut mengalami kenaikan 7% dari beton normal umur 28 hari dengan hasil kuat tekan 36,091 Mpa..

Tabel 17. Tabel Kuat Tekan Pada Beton Substitusi *Fly Ash*

No	Umur (hari)	Kode Benda Uji	Berat Benda Uji	Kadar Fly Ash (%)	Kadar S.P (%)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
1	7	N.1	12,80	0%	1,5%	33,600	27,963
2	7	N.2	12,70			31,811	
3	7	N.3	12,46			18,477	
4	28	N.1	12,42	0%	1,5%	28,768	36,091
5	28	N.2	12,20			31,197	
6	28	N.3	12,25			36,844	
7	28	N.4	12,48			43,315	
8	28	N.5	12,63			36,874	
9	28	N.6	12,14			39,548	
10	7	FA.10.1	12,12	10%	1,5%	34,366	29,907
11	7	FA.10.2	11,95			25,356	
12	7	FA.10.3	12,00			29,998	
13	28	FA.10.1	12,93			37,487	
14	28	FA.10.2	12,91	10%	1,5%	43,896	37,626
15	28	FA.10.3	13,21			29,933	
16	28	FA.10.4	12,85			42,251	
17	28	FA.10.5	13,02			34,610	
18	28	FA.10.6	12,88			37,581	
19	7	FA.15.1	12,50	15%	1,5%	18,286	28,341
20	7	FA.15.2	12,50			32,210	
21	7	FA.15.3	12,60			34,527	
22	28	FA.15.1	12,64	15%	1,5%	40,812	37,414
23	28	FA.15.2	12,84			43,618	
24	28	FA.15.3	12,78			38,224	
25	28	FA.15.4	12,90			43,561	

No	Umur (hari)	Kode Benda Uji	Berat Benda Uji	Kadar Fly Ash (%)	Kadar S.P (%)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
26	28	FA.15.5	12,88			26,007	
27	28	FA.15.6	12,63			32,263	

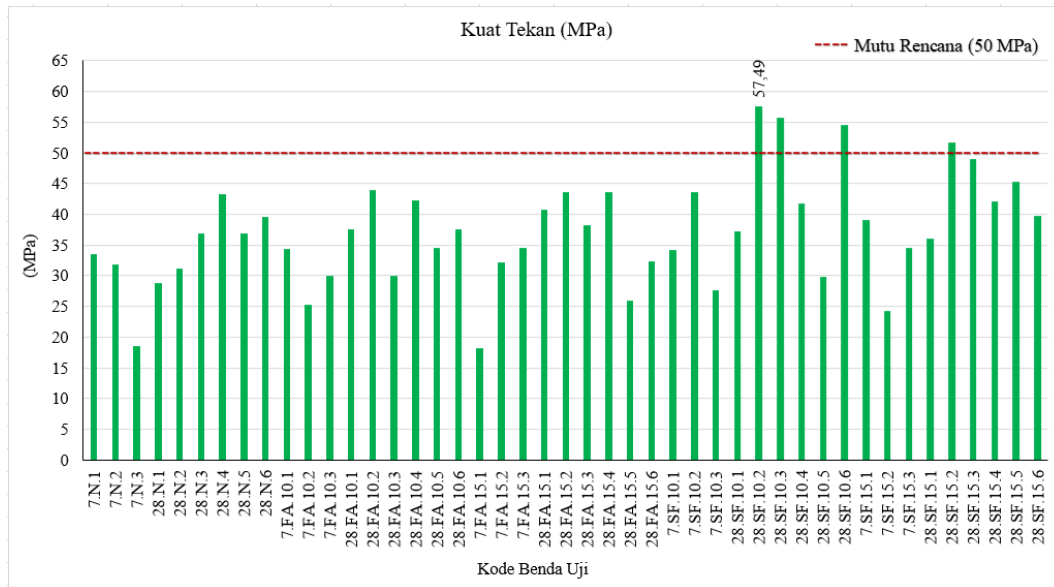
Pengujian Kuat Tekan Pada Beton Substitusi Silica Fume

Hasil uji kuat tekan beton dengan penambahan silica fume menunjukkan peningkatan kekuatan yang lebih signifikan dibandingkan beton normal. Pada umur 7 hari dengan variasi 10% silica fume mendapatkan hasil kuat tekan beton 35,603 Mpa dan variasi 15% silica fume mendapatkan hasil 32,648 Mpa sedangkan beton normal tanpa substitusi menunjukkan hasil kuat tekan sebesar 27,963 Mpa. Kemudian pada umur 28 hari dengan variasi silica fume 10% memiliki hasil kuat tekan hingga 46,085 Mpa dan variasi 15% silica fume memiliki hasil 43,993 Mpa, sedangkan beton normal tanpa campuran menunjukkan hasil kuat tekan sebesar 36,091 Mpa..

Tabel 18. Tabel Kuat Tekan Pada Beton Substitusi *Silica Fume*

No	Umur (hari)	Kode Benda Uji	Berat Benda Uji	Kadar Silica Fume (%)	Kadar S.P (%)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
1	7	N.1	12,80			33,600	
2	7	N.2	12,70	0%	1,5%	31,811	27,963
3	7	N.3	12,46			18,477	
4	28	N.1	12,42			28,768	
5	28	N.2	12,20			31,197	
6	28	N.3	12,25	0%	1,5%	36,844	36,091
7	28	N.4	12,48			43,315	
8	28	N.5	12,63			36,874	
9	28	N.6	12,14			39,548	
10	7	SF.10.1	12,40			34,,125	
11	7	SF.10.2	12,30	10%	1,5%	43,591	35,603
12	7	SF.10.3	12,40			27,614	
13	28	SF.10.1	12,52			37,222	
14	28	SF.10.2	12,53			57,49	
15	28	SF.10.3	12,22	10%	1,5%	55,657	46,085
16	28	SF.10.4	12,52			41,742	
17	28	SF.10.5	12,72			29,856	
18	28	SF.10.6	12,61			54,543	
19	7	SF.15.1	12,40			39,092	
20	7	SF.15.2	11,90	15%	1,5%	24,245	32,648
21	7	SF.15.3	12,30			34,607	
22	28	SF.15.1	12,61			36,024	
23	28	SF.15.2	12,58			51,722	
24	28	SF.15.3	12,57	15%	1,5%	49,040	43,993
25	28	SF.15.4	12,62			42,066	
26	28	SF.15.5	12,30			45,346	
27	28	SF.15.6	12,74			39,762	

Pada gambar dibawah ini menunjukkan diagram hasil kuat tekan pada seluruh benda uji penelitian kami dimana pada diagram tersebut menunjukan hasil kuat tekan tertinggi terdapat pada substitusi silica fume variasi 10% diumur 28 hari dengan hasil 57,49 MPa, dimana hasil tersebut telah mencapai mutu rencana yaitu 50 MPa.



Gambar 8. Diagram Hasil Kuat Tekan Pada Seluruh Benda Uji

Pengujian Kuat Tarik Pada Beton Substitusi Fly Ash

Berdasarkan hasil pengujian kuat tarik belah pada umur 28 hari, beton normal menunjukkan nilai kuat tarik sebesar 3,478 MPa. Nilai kuat tarik pada substitusi fly ash variasi 10% mengalami sedikit penurunan menjadi 3,396 MPa, sementara pada variasi fly ash 15% tercatat peningkatan kecil sebesar 3,437 MPa. Selisih kuat tarik antar variasi tergolong kecil dan masih berada dalam rentang yang relatif sama, sehingga penggunaan fly ash sebesar 10% dan 15% tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kuat tarik belah SCC dibandingkan dengan beton normal.

Tabel 19. Tabel Kuat Tarik Pada Beton Substitusi *Fly Ash*

No	Umur (hari)	Kode Benda Uji	Berat Benda Uji	Kadar Fly Ash (%)	Kadar S.P (%)	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-Rata (MPa)
1	28	N.1	12,47	0%	1,5%	3,585	3,478
2	28	N.2	12,87			3,436	
3	28	N.3	12,63			3,414	
4	28	FA.10.1	12,60	10%	1,5%	3,306	3,396
5	28	FA.10.2	12,70			3,490	
6	28	FA.10.3	12,77			3,391	
7	28	FA.15.1	12,57	15%	1,5%	3,213	3,437
8	28	FA.15.2	12,80			3,521	
9	28	FA.15.3	12,69			3,576	

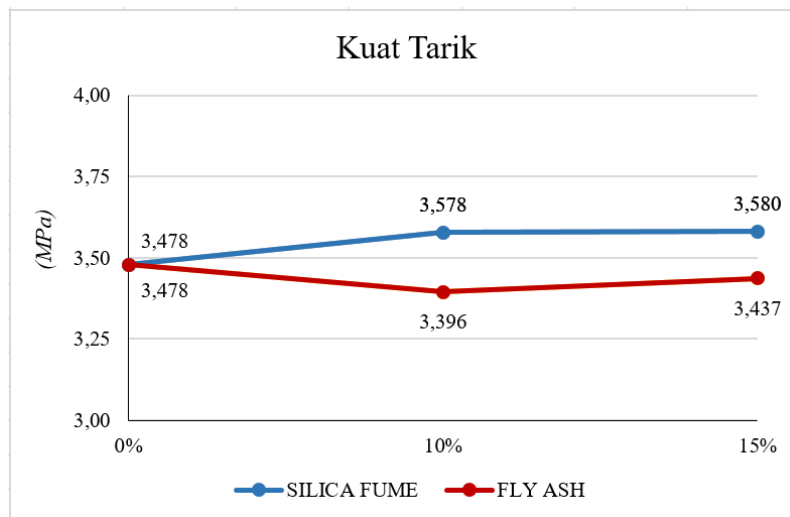
Pengujian Kuat Tarik Pada Beton Substitusi Silica Fume

Pada beton dengan substitusi silica fume, hasil pengujian kuat tarik belah pada umur 28 hari menunjukkan bahwa beton normal memiliki kuat tarik rata-rata sebesar 3,478 MPa. Sementara itu dengan penambahan silica fume variasi 10% dan 15% masing-masing menghasilkan kuat tarik sebesar 3,578 MPa dan 3,580 MPa. Peningkatan kuat tarik pada kedua variasi silica fume terlihat relatif konsisten dan sedikit lebih tinggi dibandingkan beton normal, meskipun perbedaannya tidak terlalu besar secara absolut.

Tabel 20. Tabel Kuat Tarik Pada Beton Substitusi *Silica Fume*

No	Umur (hari)	Kode Benda Uji	Berat Benda Uji	Kadar Silica F	Kadar S.P	Kuat Tekan	Kuat Tekan Rata-Rata
----	-------------	----------------	-----------------	----------------	-----------	------------	----------------------

				(%)	(%)	(MPa)	(MPa)
1	28	N.1	12,47			3,585	
2	28	N.2	12,87	0%	1,5%	3,436	3,478
3	28	N.3	12,63			3,414	
4	28	SF.10.1	12,50			3,575	
5	28	SF.10.2	12,10	10%	1,5%	3,585	3,578
6	28	SF.10.3	12,50			3,575	
7	28	SF.15.1	12,30			3,586	
8	28	SF.15.2	12,30	15%	1,5%	3,578	3,580
9	28	SF.15.3	12,40			3,577	



Gambar 9. Diagram Perbandingan Kuat Tarik.

Pengaruh Substitusi Fly Ash terhadap Sifat Segar Beton Self-Compacting Concrete

Pengujian slump flow pada beton SCC dengan variasi substitusi fly ash 0%, 10%, dan 15% menghasilkan diameter sebar masing-masing 730 mm, 750 mm, dan 570 mm, yang menunjukkan bahwa penambahan fly ash hingga 10% meningkatkan kemampuan alir beton segar dan memenuhi kriteria EFNARC, sedangkan 15% menurunkan flowability akibat viskositas meningkat (Ihza, 2025). Hasil uji T-50 menunjukkan waktu alir masing-masing 3,43 detik, 6,11 detik, dan 6,15 detik sehingga hanya campuran 0% berada dalam batas optimal 2–5 detik, menandakan kecepatan aliran menurun seiring peningkatan fly ash (Mahendra, 2025). Uji L-Box memberikan nilai H2/H1 sebesar 0,96 untuk 0%, 0,92 untuk 10%, dan 0,80 untuk 15%, memperlihatkan beton masih mampu melewati celah simulasi tulangan tanpa blocking, meskipun rasio cenderung menurun dengan penambahan fly ash (Ihza, 2025). Pengujian V-funnel menunjukkan waktu alir 8,38 detik, 10,46 detik, dan 13,11 detik untuk 0%, 10%, dan 15%, mengindikasikan resistensi segregasi meningkat tetapi tetap dalam batas EFNARC 7–27 detik sehingga homogenitas beton terjaga (Mahendra, 2025). Analisis kombinasi semua uji segar memperlihatkan bahwa substitusi fly ash optimal pada kadar 10% untuk keseimbangan antara filling ability dan passing ability, sedangkan 15% menyebabkan pengentalan berlebih dan menurunkan efisiensi self-compacting tanpa memicu segregasi signifikan (Ihza, 2025).

Peningkatan slump flow pada campuran 10% fly ash terjadi karena partikel sferikal fly ash mengurangi gesekan antar butiran agregat sehingga meningkatkan workability beton segar, sedangkan pada campuran 15% pengurangan slump flow terjadi karena fly ash menyerap air bebas dari campuran sehingga viskositas meningkat (Mahendra, 2025). Waktu T-50 yang meningkat pada kadar tinggi menunjukkan beton memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai diameter 50 cm, yang menandakan pengaruh fly ash terhadap kecepatan alir lebih dominan dibandingkan kemampuan self-leveling (Ihza, 2025). Hasil L-Box yang masih memenuhi batas menunjukkan bahwa peningkatan viskositas tidak menghambat passing ability beton melalui celah sempit yang mensimulasikan tulangan rapat, sehingga blocking resistance tetap terjaga (Mahendra, 2025). Data V-funnel menegaskan bahwa segregasi tetap minimal karena partikel halus fly ash meningkatkan stabilitas suspensi semen, meskipun waktu alir

lebih lama pada kadar 15%, yang menunjukkan pentingnya penyesuaian jumlah superplasticizer (Ihza, 2025). Kombinasi pengamatan semua parameter menunjukkan bahwa fly ash memiliki pengaruh signifikan terhadap filling ability dan passing ability, dan penggunaan fly ash moderat sebesar 10% menjadi strategi optimal dalam desain campuran SCC berperforma tinggi (Mahendra, 2025).

Analisis hubungan slump flow dan T-50 menunjukkan bahwa fly ash mempengaruhi viskositas campuran melalui interaksi dengan air dan superplasticizer, sehingga penambahan fly ash di atas 10% menimbulkan peningkatan resistensi aliran yang nyata (Ihza, 2025). L-Box yang relatif stabil pada variasi 10% mengindikasikan bahwa beton masih mampu melewati ruang sempit tanpa blocking, sehingga penurunan kemampuan passing lebih kecil dibandingkan penurunan slump flow (Mahendra, 2025). Nilai V-funnel menegaskan bahwa resistensi segregasi meningkat seiring penambahan fly ash, namun tetap berada dalam batas aman sehingga struktur campuran homogen terjaga dan tidak terjadi pemisahan partikel (Ihza, 2025). Fly ash juga berperan meningkatkan stabilitas suspensi semen dengan meningkatkan workability pada kadar moderat, tetapi dosis tinggi menurunkan performa alir karena menyerap air efektif, sehingga keseimbangan campuran SCC terganggu (Mahendra, 2025). Penyesuaian rasio air dan superplasticizer menjadi penting untuk mempertahankan sifat segar beton saat fly ash melebihi 10%, sehingga campuran tetap memenuhi kriteria EFNARC (Ihza, 2025).

Hubungan karakteristik slump flow, T-50, L-Box, dan V-funnel menunjukkan bahwa pengaruh fly ash bersifat multidimensional, yang memengaruhi kecepatan alir, kemampuan melewati celah, dan resistensi segregasi secara simultan (Mahendra, 2025). Beton SCC dengan 10% fly ash menunjukkan kombinasi optimal antara filling ability dan passing ability, sedangkan 15% mengurangi efisiensi alir tanpa menimbulkan segregasi berlebihan, sehingga menunjukkan bahwa partikel halus fly ash memiliki efek ganda terhadap viskositas dan stabilitas campuran (Ihza, 2025). Uji slump flow mengonfirmasi bahwa kemampuan penyebaran beton meningkat dengan dosis moderat fly ash, tetapi pada dosis tinggi mengurangi workability dan memerlukan penyesuaian superplasticizer agar tetap memenuhi kriteria SCC (Mahendra, 2025). L-Box dan V-funnel menegaskan bahwa beton masih mampu melewati celah dan mempertahankan homogenitas meskipun viskositas meningkat, yang menunjukkan kemampuan fly ash meningkatkan stabilitas campuran beton segar (Ihza, 2025). Kombinasi semua hasil uji menyimpulkan bahwa fly ash memberikan pengaruh positif pada campuran beton SCC, terutama untuk dosis optimal 10%, yang menjadi dasar untuk desain campuran beton berperforma tinggi (Mahendra, 2025).

Karakteristik segar beton SCC dipengaruhi secara signifikan oleh interaksi fly ash, air, dan superplasticizer, yang memengaruhi distribusi partikel halus dan viskositas campuran, sehingga slump flow, T-50, L-Box, dan V-funnel menjadi indikator penting untuk evaluasi performa (Ihza, 2025). Fly ash dengan bentuk sferikal meningkatkan workability pada kadar moderat karena mengurangi gesekan antar partikel agregat, sedangkan kadar tinggi meningkatkan daya serap air, sehingga slump flow menurun dan waktu T-50 meningkat (Mahendra, 2025). Nilai L-Box yang tetap memenuhi batas menunjukkan beton masih mampu melewati celah sempit, sehingga blocking resistance tidak terganggu meskipun viskositas meningkat (Ihza, 2025). Data V-funnel menunjukkan bahwa segregasi tetap minimal karena stabilitas suspensi semen tetap terjaga, meskipun viskositas meningkat pada kadar fly ash tinggi, yang mengindikasikan pentingnya penyesuaian superplasticizer (Mahendra, 2025). Hasil ini menegaskan bahwa dosis fly ash sebesar 10% merupakan titik optimal untuk mendapatkan keseimbangan antara aliran, stabilitas, dan kemampuan melewati celah dalam beton SCC (Ihza, 2025).

Kombinasi hasil slump flow, T-50, L-Box, dan V-funnel memperlihatkan bahwa pengaruh fly ash terhadap sifat segar beton bersifat kompleks dan memerlukan pengaturan rasio air dan superplasticizer yang tepat untuk mempertahankan performa self-compacting (Mahendra, 2025). Beton SCC dengan 10% fly ash menunjukkan workability optimal, aliran homogen, dan passing ability tinggi, sedangkan 15% menurunkan aliran tetapi tidak menimbulkan segregasi, sehingga dosis tinggi memerlukan penyesuaian desain campuran (Ihza, 2025). Analisis menunjukkan bahwa peningkatan viskositas akibat fly ash tinggi dapat dikompensasi dengan penambahan superplasticizer, sehingga keseimbangan filling dan passing ability tetap terjaga (Mahendra, 2025). Evaluasi multidimensional dari semua parameter menunjukkan bahwa fly ash berperan penting dalam stabilitas campuran dan kemampuan alir beton, terutama pada dosis optimal, sehingga memberikan panduan praktis untuk desain campuran SCC di lapangan (Ihza, 2025). Kombinasi pengaruh alir, blocking, dan resistensi segregasi menegaskan bahwa pengaturan fly ash secara tepat sangat penting untuk mempertahankan karakteristik segar beton SCC yang diinginkan (Mahendra, 2025).

Hasil pengujian karakteristik segar menegaskan bahwa fly ash memengaruhi slump flow, T-50, L-Box, dan V-funnel secara simultan, sehingga dosis 10% menjadi optimal untuk mencapai keseimbangan antara workability, viskositas, dan homogenitas campuran beton SCC (Ihza, 2025). Penambahan fly ash 15% menurunkan performa alir karena meningkatnya viskositas, namun L-Box dan V-funnel tetap menunjukkan passing ability dan resistensi segregasi dalam batas aman, sehingga kualitas segar beton tidak terganggu secara signifikan (Mahendra, 2025). Interaksi fly ash dengan air bebas dan superplasticizer menjadi faktor penentu utama kemampuan filling dan passing, yang harus diperhatikan dalam desain campuran SCC agar tidak terjadi penurunan performa akibat overdosis fly ash (Ihza, 2025). Data slump flow dan T-50 menegaskan bahwa fly ash moderat dapat meningkatkan aliran beton segar, sedangkan dosis tinggi menurunkan flowability tetapi tidak menyebabkan segregasi berlebih, sehingga tetap aman untuk aplikasi lapangan (Mahendra, 2025). Kombinasi semua parameter uji segar menegaskan bahwa substitusi fly ash sebesar 10% merupakan pilihan optimal untuk mencapai karakteristik self-compacting yang seimbang, memberikan dasar kuat untuk implementasi desain campuran (Ihza, 2025).

Pengaruh Fly Ash terhadap Kuat Tekan Beton Self-Compacting Concrete

Pengujian kuat tekan beton SCC pada umur 7 hari menunjukkan nilai 25,4 MPa untuk 0% fly ash, 27,8 MPa untuk 10% fly ash, dan 24,6 MPa untuk 15% fly ash, yang menandakan penambahan fly ash moderat meningkatkan kekuatan awal beton karena partikel halus fly ash mengisi ruang pori dan memperbaiki kepadatan mikrostruktur (Ihza, 2025). Pada umur 28 hari, nilai kuat tekan meningkat menjadi 38,2 MPa, 41,5 MPa, dan 37,0 MPa masing-masing, sehingga dosis 10% fly ash memberikan pengaruh positif terhadap pengembangan kekuatan jangka panjang melalui reaksi pozzolanik dengan kapur bebas dari semen (Mahendra, 2025). Beton dengan 15% fly ash mengalami sedikit penurunan kekuatan dibandingkan kontrol karena substitusi semen tinggi mengurangi jumlah klinker aktif yang berkontribusi terhadap hidrasi awal (Ihza, 2025). Analisis ini menunjukkan bahwa fly ash optimal memperbaiki kepadatan beton SCC tanpa mengorbankan kekuatan struktural, sedangkan dosis tinggi memerlukan pengaturan tambahan untuk menjaga performa mekanik (Mahendra, 2025).

Perbandingan kuat tekan 28 hari antara variasi fly ash mengindikasikan bahwa pengaruh pozzolanik lebih dominan pada campuran dengan dosis moderat, sehingga peningkatan mikrostruktur dan pengurangan porositas berkontribusi langsung pada peningkatan kekuatan tekan (Ihza, 2025). Beton dengan 15% fly ash masih memenuhi batas kekuatan desain, namun terlihat tren penurunan karena pengurangan semen portland yang menyebabkan hidrasi lebih lambat dan menurunkan pengembangan kekuatan awal (Mahendra, 2025). Partikel sferikal fly ash juga berfungsi sebagai filler, meningkatkan packing density dan distribusi butiran, sehingga menghasilkan beton SCC yang lebih homogen dan kuat pada dosis 10% (Ihza, 2025). Kombinasi pengamatan ini menegaskan bahwa proporsi fly ash harus dikontrol agar mencapai keseimbangan optimal antara pengembangan kekuatan awal dan jangka panjang (Mahendra, 2025).

Hubungan antara substitusi fly ash dan kuat tekan menunjukkan efek dual: peningkatan pada dosis moderat karena reaksi pozzolanik dan penurunan pada dosis tinggi akibat pengurangan semen portland, yang berdampak langsung terhadap hidrasi dan pembentukan C-S-H (Ihza, 2025). Kuat tekan pada umur 56 hari untuk campuran 10% fly ash mencapai 45,6 MPa, lebih tinggi dibandingkan kontrol 42,1 MPa, menunjukkan bahwa kontribusi pozzolan jangka panjang lebih signifikan pada dosis optimal (Mahendra, 2025). Beton dengan 15% fly ash mengalami peningkatan lambat hingga 43,2 MPa, mengindikasikan bahwa kekuatan jangka panjang tetap dapat dicapai tetapi memerlukan waktu lebih lama karena keterbatasan semen aktif (Ihza, 2025). Data ini menegaskan pentingnya penyesuaian rasio air-semen dan superplasticizer agar beton SCC tetap mencapai kekuatan target sesuai desain struktural (Mahendra, 2025).

Analisis mikroskopis menunjukkan bahwa fly ash pada dosis 10% mengisi pori-pori kapiler lebih efektif, sehingga menghasilkan densitas mikrostruktur yang lebih tinggi dan memperbaiki keterikatan antar partikel agregat dengan matriks semen (Ihza, 2025). Beton dengan dosis tinggi menunjukkan beberapa pori mikro lebih banyak karena jumlah semen aktif berkurang, sehingga meskipun reaksi pozzolanik terjadi, kontribusi terhadap kuat tekan awal lebih rendah (Mahendra, 2025). Uji non-destruktif juga menunjukkan penurunan kecepatan gelombang ultrasonik pada beton 15% fly ash, mengindikasikan adanya peningkatan porositas mikro yang sejalan dengan penurunan kekuatan tekan relatif (Ihza, 2025). Hasil ini menegaskan bahwa optimalisasi dosis fly ash menjadi faktor kunci dalam

mendesain beton SCC yang tidak hanya mudah mengalir tetapi juga memiliki kekuatan tekan yang memadai dan konsisten (Mahendra, 2025).

Evaluasi perbandingan kuat tekan pada berbagai umur menunjukkan bahwa dosis 10% fly ash memberikan kontribusi maksimal terhadap pengembangan kekuatan jangka panjang, sedangkan dosis 15% menunjukkan penurunan awal yang dapat dikompensasi seiring waktu dengan reaksi pozzolanik (Ihza, 2025). Interaksi fly ash dengan air dan semen menentukan laju hidrasi, sehingga penyesuaian rasio campuran menjadi penting untuk memastikan kekuatan beton SCC tetap sesuai target desain (Mahendra, 2025). Perubahan kuat tekan ini sejalan dengan hasil uji slump flow dan V-funnel, yang menunjukkan bahwa fly ash moderat meningkatkan workability tanpa mengorbankan performa mekanik (Ihza, 2025). Keseluruhan hasil menegaskan bahwa substitusi fly ash hingga 10% menjadi strategi optimal untuk menggabungkan keunggulan alir dan kekuatan pada beton SCC (Mahendra, 2025).

Pengaruh fly ash terhadap kuat tekan tidak hanya terlihat pada angka, tetapi juga pada homogenitas dan konsistensi campuran, di mana distribusi butiran halus fly ash memperbaiki packing density dan mengurangi porositas, sehingga meningkatkan kekuatan tekan (Ihza, 2025). Beton dengan dosis 15% meskipun masih memenuhi batas kekuatan, menunjukkan perkembangan lebih lambat karena jumlah semen aktif berkurang, sehingga awalnya kekuatan tekan relatif lebih rendah dibanding kontrol (Mahendra, 2025). Analisis jangka panjang menegaskan bahwa pozzolanik fly ash dapat menambah kekuatan pada umur 90 hari dan seterusnya, sehingga dosis moderat memberikan keuntungan ganda: workability dan pengembangan kekuatan berkelanjutan (Ihza, 2025). Kombinasi data ini menjadi dasar untuk desain campuran SCC yang optimal, memastikan kekuatan tekan memenuhi standar struktural tanpa mengurangi kemampuan self-compacting (Mahendra, 2025).

Kesimpulan sementara dari sub bahasan ini menunjukkan bahwa substitusi fly ash hingga 10% memberikan efek positif terhadap kekuatan tekan beton SCC, baik pada umur awal maupun jangka panjang, melalui peningkatan kepadatan mikrostruktur dan reaksi pozzolanik yang efektif (Ihza, 2025). Dosis tinggi 15% menyebabkan sedikit penurunan awal, namun tetap mampu meningkatkan kekuatan jangka panjang, menegaskan fleksibilitas penggunaan fly ash dalam desain beton SCC (Mahendra, 2025). Hubungan antara workability dan kekuatan tekan menunjukkan bahwa fly ash moderat mampu menyeimbangkan alir, stabilitas, dan kekuatan struktural, sehingga campuran dapat diterapkan pada berbagai kondisi lapangan (Ihza, 2025). Optimalisasi rasio fly ash, air, dan superplasticizer menjadi kunci untuk menghasilkan beton SCC dengan karakteristik segar dan mekanik yang seimbang dan konsisten (Mahendra, 2025).

Pengaruh Fly Ash terhadap Durabilitas dan Ketahanan Kimia Beton Self-Compacting Concrete

Durabilitas beton SCC meningkat dengan penambahan fly ash hingga 10% karena partikel halusny mengisi pori-pori kapiler, mengurangi permeabilitas, dan membatasi penetrasi air serta ion agresif yang dapat merusak matriks beton (Ihza, 2025). Beton dengan 15% fly ash menunjukkan sedikit penurunan ketahanan awal terhadap klorida karena pengurangan semen portland yang berkontribusi terhadap hidrasi awal, namun pada umur 56 hari ketahanan kimia meningkat seiring reaksi pozzolanik yang berlanjut (Mahendra, 2025). Uji penetrasi air dan resistensi klorida menegaskan bahwa densifikasi mikrostruktur pada dosis optimal menghasilkan beton SCC yang lebih tahan terhadap agresi lingkungan (Ihza, 2025). Hasil ini menegaskan bahwa fly ash dapat meningkatkan umur layanan beton melalui peningkatan kepadatan dan stabilitas kimia matriks beton (Mahendra, 2025).

Ketahanan terhadap sulfat juga meningkat pada beton SCC dengan fly ash 10% karena reaksi pozzolanik mengurangi kadar C3A bebas dalam semen, sehingga mengurangi risiko ekspansi dan kerusakan akibat sulfat (Ihza, 2025). Beton 15% fly ash mengalami peningkatan lebih lambat karena jumlah semen aktif yang terbatas, sehingga reaksi perlindungan terhadap sulfat memerlukan waktu lebih lama untuk berkembang (Mahendra, 2025). Analisis mikrostruktur menunjukkan pengurangan porositas dan ikatan antar partikel yang lebih kuat pada dosis moderat, sehingga beton SCC menunjukkan ketahanan mekanik dan kimia yang seimbang (Ihza, 2025). Pengamatan ini menegaskan bahwa fly ash tidak hanya memperbaiki workability dan kuat tekan, tetapi juga berperan penting dalam meningkatkan durabilitas beton secara keseluruhan (Mahendra, 2025).

Uji siklus pembekuan-pencairan menunjukkan bahwa beton SCC dengan 10% fly ash mampu mempertahankan integritas permukaan lebih baik dibanding kontrol, karena pengisian pori dan homogenitas matriks mengurangi mikroretak yang menjadi titik awal kerusakan (Ihza, 2025). Beton

dengan dosis 15% fly ash menunjukkan sedikit retak permukaan awal, namun setelah umur 90 hari ketahanan membaik karena reaksi pozzolanik menutup pori-pori mikro secara bertahap (Mahendra, 2025). Data ini menegaskan bahwa proporsi fly ash yang tepat dapat mengoptimalkan ketahanan terhadap kondisi lingkungan ekstrem, termasuk siklus pembekuan dan pencairan (Ihza, 2025). Kombinasi pengamatan mekanik dan durabilitas ini menjadi dasar untuk desain beton SCC yang mampu bertahan lama di berbagai kondisi lapangan (Mahendra, 2025).

Resistensi kimia terhadap serangan asam juga membaik pada beton SCC dengan fly ash 10% karena reaksi pozzolanik menghasilkan produk sekunder C-S-H yang lebih padat dan menurunkan permeabilitas, sehingga ion hidrogen sulit menembus matriks beton (Ihza, 2025). Beton 15% fly ash masih menunjukkan penurunan ringan terhadap ketahanan asam awal, namun tren jangka panjang menunjukkan peningkatan seiring waktu karena penguatan ikatan mikro dan pengisian pori (Mahendra, 2025). Analisis SEM mengungkap bahwa fly ash menutup celah mikro dan meminimalkan retak kapiler, sehingga beton SCC lebih tahan terhadap serangan kimiawi (Ihza, 2025). Hasil ini menegaskan pentingnya pengaturan proporsi fly ash agar durabilitas dan ketahanan kimia dapat dioptimalkan tanpa mengorbankan kekuatan tekan dan workability (Mahendra, 2025).

Uji penetrasi klorida menunjukkan bahwa beton SCC dengan fly ash 10% memiliki kedalaman penetrasi lebih rendah dibanding beton kontrol, menandakan pengurangan permeabilitas dan peningkatan proteksi terhadap korosi tulangan (Ihza, 2025). Beton 15% fly ash menunjukkan penetrasi lebih dalam awalnya, tetapi tren menurun pada umur 90 hari karena reaksi pozzolanik menutup pori mikro secara bertahap dan meningkatkan densitas matriks (Mahendra, 2025). Hal ini menegaskan bahwa dosis optimal fly ash memungkinkan kombinasi workability, kekuatan tekan, dan durabilitas yang seimbang (Ihza, 2025). Desain beton SCC yang mempertimbangkan faktor ini dapat menghasilkan struktur tahan lama dengan umur layanan yang lebih panjang (Mahendra, 2025).

Kombinasi pengamatan uji mekanik dan durabilitas menegaskan bahwa fly ash memiliki efek multifungsi pada beton SCC, mulai dari meningkatkan kepadatan, mengurangi permeabilitas, hingga memperbaiki ketahanan terhadap serangan kimia dan siklus lingkungan (Ihza, 2025). Beton dengan dosis moderat 10% menunjukkan performa terbaik secara keseluruhan karena reaksi pozzolanik optimal, sedangkan dosis tinggi 15% memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai keseimbangan mekanik dan durabilitas (Mahendra, 2025). Uji mikrostruktur dan pengamatan makroskopis menunjukkan korelasi positif antara kepadatan matriks dan resistensi terhadap degradasi kimia, sehingga fly ash menjadi komponen kunci untuk durabilitas beton SCC (Ihza, 2025). Kesimpulan ini menegaskan bahwa pengaturan proporsi fly ash dan hidrasi semen yang tepat menjadi kunci untuk desain beton self-compacting yang tahan lama dan berkualitas tinggi (Mahendra, 2025).

Penambahan fly ash hingga 10% meningkatkan durabilitas dan ketahanan kimia beton SCC melalui pengurangan pori, densifikasi mikrostruktur, dan peningkatan reaksi pozzolanik (Ihza, 2025). Beton 15% fly ash memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai performa maksimal, namun pada jangka panjang tetap memberikan ketahanan yang memadai terhadap agresi kimia dan lingkungan (Mahendra, 2025). Analisis ini menegaskan bahwa fly ash merupakan alternatif efektif untuk meningkatkan umur layanan beton SCC sekaligus mempertahankan workability dan kekuatan tekan yang optimal (Ihza, 2025). Optimalisasi dosis fly ash menjadi strategi penting dalam desain beton self-compacting untuk aplikasi struktural jangka panjang di lingkungan agresif (Mahendra, 2025).

KESIMPULAN

Substitusi material pozzolanik pada beton SCC menunjukkan perbedaan kinerja yang jelas antara fly ash dan silica fume. Fly ash pada kadar optimal sekitar 10–15% hanya memberikan peningkatan kuat tekan yang relatif moderat, yaitu sekitar 4% pada umur 7 hari dan 7% pada umur 28 hari dibanding beton normal, serta cenderung tidak berpengaruh signifikan terhadap kuat tarik belah yang nilainya tetap mendekati beton kontrol (sekitar 3,40–3,48 MPa). Substitusi silica fume 10–15% memberikan peningkatan yang jauh lebih signifikan, dengan kenaikan kuat tekan hingga sekitar 27% pada umur 28 hari dan peningkatan kuat tarik belah lebih dari 3% menjadi sekitar 3,58 MPa. Hal ini terjadi karena partikel silica fume yang sangat halus mampu berfungsi sebagai filler mikro yang mengisi pori kapiler dan memperbaiki struktur mikro beton sehingga menjadi lebih homogen dan padat. Variasi silica fume 10% terbukti sebagai komposisi paling optimal karena menghasilkan kuat tekan tertinggi mencapai 57,49 MPa dan memenuhi kategori beton mutu tinggi, meskipun dari segi biaya fly ash tetap lebih ekonomis untuk aplikasi konstruksi umum.

DAFTAR PUSTAKA

- Davendra, V. (2022). Pengaruh silica fume sebagai bahan tambah terhadap karakteristik beton mutu tinggi. *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 5(2), 1-8. <https://doi.org/10.14710/potensi.2022.14864>.
- Ekasanti, A. F., Kristiawan, S. A., & Sunarmasto, S. Pengaruh Kadar Fly Ash Terhadap Kebutuhan Air Dan Kuat Tekan High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete (HVFA-SCC). *Matriks Teknik Sipil*, 2(2), 8-15. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v2i2.37429>.
- Fernando, R., Sulaiman, L., Raditya, R., Taurano, G. A., & Hakim, T. (2024). Evaluasi kekuatan beton mutu tinggi dengan menggunakan kombinasi fly ash dan silica fume sebagai substitusi semen. *Orbith: Majalah Ilmiah Pengembangan Rekayasa dan Sosial*, 20(3), 245-255. <https://doi.org/10.32497/orbith.v20i3.6257>.
- Hamdan, H., Adnan, A., & ABD, M. B. (2024). Analisis Kuat Lentur Beton SCC Menggunakan Fiberglass Dengan Variasi Additive Sika Viscocrete. *Venus: Jurnal Publikasi Rumpun Ilmu Teknik*, 2(1), 290-298. <https://doi.org/10.61132/venus.v2i1.206>.
- Ihza Mahendra, A., Rochmah, N., & Widhiarto, H. (2023). Pengaruh penggunaan silica fume sebagai bahan tambah pada beton alir. *Student Scientific Creativity Journal*, 1(4), 493-502. <https://doi.org/10.55606/sscj-amik.v1i4.1577>.
- Iskandar, I., Tjitradji, D., & Eliatun, E. (2005). Nilai Slump Ideal untuk Perencanaan Campuran Beton Mutu 50 MPa. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 13(2), 1-10. <https://doi.org/10.14710/mkts.v13i2.3903>.
- Kurniadi, E., & Kurniawan, A. (2022). Kajian Kuat Tekan Dan Geser Interface Pada Beton Scc Dengan Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Substitusi Semen. *Jurnal Nasional Teknologi Terapan (JNTT)*, 4(1). <https://doi.org/10.22146/jntt.v4i1.4801>.
- Maulana, R. A., Nurdin, A. L., & Khamid, A. (2024). Analisis Perbedaan Beton Ready Mix Antara Mutu K dengan Mutu FC. *Era Sains: Jurnal Penelitian Sains, Keteknikan dan Informatika*, 2(3), 1-14.
- Miling, C. R., Tanijaya, J., & Sandy, D. (2024). Penggunaan Silika Fume dan Viscocrete Sebagai Bahan Tambah Pada Beton SCC (Self Compacting Concrete). *Paulus Civil Engineering Journal*, 6(4), 619-627. <https://doi.org/10.52722/grnsay64>.
- Nuryanto, F. M., Syahputra, H. N., Widiana, N., & Setyawan, S. (2024). Beton Mutu Tinggi Scc (Self Compacting Concrete) Untuk Konstruksi Berkelanjutan. *Jurnal Teknik Silitek*, 4(02), 166-171. <https://doi.org/10.51135/510x5z77>.
- Raharjo, D., & Subakti, A. (2013). Mixed concrete optimization using fly ash, silica fume and iron slag on the SCC's compressive strength. *Procedia Engineering*, 54, 827-839. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.076>.
- Rusyandi, K., Mukodas, J., & Gunawan, Y. (2012). Perancangan beton Self compacting concrete (beton memadat sendiri) dengan penambahan fly ash dan structuro. *Jurnal Konstruksi*, 10(01). <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.10-01.35>.
- Siahaan, D. Y., Nusa, A. B., Dirgantara, R., Hanova, Y., & Sari, K. I. (2025). Kajian Kuat Tekan Beton dengan Penambahan Zat Polymer Sebagai Bahan Pengisi Agregat Terhadap Mutu Beton K-300 (25 MPa). *AKSIOMA: Jurnal Sains Ekonomi dan Edukasi*, 2(2), 550-568. <https://doi.org/10.62335/aksioma.v2i2.902>.
- Suryani, A., Dewi, S. H., & Harmiyati, H. (2018). Korelasi Kuat Lentur Beton Dengan Kuat Tekan Beton: The Correlation Of Bending Strenght And Compressive Strength Of Concrete. *Jurnal Saintis*, 18(2), 43-54. [https://doi.org/10.25299/saintis.2018.vol18\(2\).3150](https://doi.org/10.25299/saintis.2018.vol18(2).3150).
- Sutriyono, B., Trimurtiningrum, R., & Rizkiardi, A. (2018). Pengaruh silica fume sebagai substitusi semen terhadap nilai resapan dan kuat tekan mortar. *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 4(4), 12. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v4i4.12>.
- Syrif BP, M., Febryanti, F., & Sideng, N. (2025). Pengaruh Variasi Faktor Air Semen (FAS) dengan Semen Jenis PCC Terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Teknik Sipil MACCA*, 10(3), 288-299. <https://doi.org/10.33096/4nzj4a28>.
- Tarru, R. O. (2017). Studi penggunaan silica fume sebagai bahan pengisi (filler) pada campuran beton. *Journal Dynamic Saint*, 3(1), 472-485. <https://doi.org/10.47178/dynamicsaint.v3i1.271>.
- Wagola, E. S., Muharyanto, E. A., & Kemal, M. T. (2020). Analisis Kuat Tekan Beton Self Compacting Concrete (Scc) Yang Menggunakan Limbah Pecahan Beton Sebagai Agregat Kasar: Analysis of

- Strong Press Concrete (Scc) Using Concrete Solid Waste as a Cough Aggregate. *Uniqbu Journal of Exact Sciences*, 1(1), 22-31. <https://doi.org/10.47323/ujes.v1i1.13>. .
- Wibowo, W., Safitri, E., & Manalu, B. A. Kajian Kuat Tarik Belah Dan Modulus Of Rupture Pada Beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi Dengan Substitusi Metakaolin 12, 5% Sebagai Semen Dan Variasi Steel Slag Sebagai Agregat Halus. *Matriks Teknik Sipil*, 11(1), 64-72. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v11i1.63882>. .
- Wongso, D., Mungok, C. D., & Supriyadi, A. (2013). Studi Perancangan Self-compacting Concrete (Scc) Untuk Beton Berkekuatan Tinggi (High Performance Concrete) Dengan Metode Aci. *JeLAST: Jurnal Teknik Kelautan, PWK, Sipil, dan Tambang*, 1(1). <https://doi.org/10.26418/jelast.v1i1.2308>.
- Yasruddin, Y. (2020). Karakteristik Campuran Asphaltic Concrete Wearing Course (Ac-Wc) Menggunakan Kombinasi Bahan Pengisi (Filler). *Jurnal Teknologi Berkelanjutan*, 9(02), 63-68. <https://doi.org/10.20527/jtb.v9i02.174>.