

INOVASI BETON SCC DENGAN PENAMBAHAN *SILICA FUME* DAN *FLY ASH* SEBAGAI BAHAN SUBSTITUSI SEMEN

Angelia Jihan Kurniawati¹, Anggi Rahmad Zulfikar²
Teknik Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Jawa Timur
E-mail: *jihangelia0704@gmail.com¹, anggizulfikar@unesa.ac.id²

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *silica fume* dan substitusi *fly ash* terhadap kuat tekan, penyerapan air, dan biaya produksi beton *Self-Compacting Concrete* (SCC). Penelitian dilakukan menggunakan metode eksperimental dengan variasi *silica fume* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%, sedangkan *fly ash* dipertahankan sebesar 20% dari total berat bahan pengikat (*cementitious*). Perencanaan campuran mengacu pada SNI 03-2834:2000 dan EFNARC 2005, dengan mutu beton rencana K-350 ($f'_c = 28$) MPa dan faktor air semen sebesar 0,26. Sebanyak 60 benda uji berbentuk silinder berukuran 150 × 300 mm digunakan dalam penelitian ini. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 8–10 jam, 7, 14, dan 28 hari, sedangkan pengujian penyerapan air dilakukan pada umur 28 hari mengacu pada ASTM C642. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan beton pada umur 28 hari meningkat dari 36,99 MPa pada variasi *silica fume* 0% menjadi 41,54 MPa, 43,21 MPa, dan 43,74 MPa pada variasi 5%, 10%, dan 15%. Sementara itu, penyerapan air menurun dari 1,74% menjadi 1,51%, 1,38%, dan 1,23%. Analisis biaya menunjukkan bahwa biaya produksi beton per m³ meningkat dari Rp940.729,00 pada variasi 0% menjadi Rp1.235.474,00, Rp1.530.219,00, dan Rp1.824.964,00 pada variasi 5%, 10%, dan 15%. Variasi *silica fume* 15% menghasilkan kuat tekan tertinggi dan penyerapan air terendah, tetapi juga memiliki biaya produksi tertinggi. Dengan demikian, peningkatan kadar *silica fume* pada beton SCC dengan substitusi *fly ash* tetap sebesar 20% meningkatkan kinerja mekanis dan menurunkan penyerapan air, tetapi berdampak pada peningkatan biaya produksi.

Kata kunci

Self-Compacting Concrete, Silica Fume, Fly Ash, Kuat Tekan Beton, Penyerapan Air.

ABSTRACT

This study aims to analyze the effects of silica fume addition and fly ash substitution on the compressive strength, water absorption, and production cost of Self-Compacting Concrete (SCC). The research employed an experimental method with silica fume variations of 0%, 5%, 10%, and 15%, while fly ash was maintained at 20% of the total cementitious material weight. The concrete mix design referred to SNI 03-2834:2000 and EFNARC 2005, with a target concrete grade of K-350 ($f'_c = 28$) MPa and a water-to-cement ratio of 0.26. A total of 60 cylindrical specimens measuring 150 × 300 mm were used in this study. Compressive strength tests were conducted at the ages of 8–10 hours, 7, 14, and 28 days, while water absorption tests were performed at 28 days in accordance with ASTM C642. The results showed that the compressive strength at 28 days increased from 36.99 MPa for the 0% silica fume variation to 41.54 MPa, 43.21 MPa, and 43.74 MPa for the 5%, 10%, and 15% variations, respectively. Meanwhile, water absorption decreased from 1.74% to 1.51%, 1.38%, and 1.23%, respectively. The cost analysis indicated that concrete production costs per m³ increased from IDR 940,729.00 for the 0% variation to IDR 1,235,474.00, IDR 1,530,219.00, and IDR 1,824,964.00 for the 5%, 10%, and 15% variations, respectively. The 15% silica fume variation achieved the highest compressive strength and the lowest water absorption, but also incurred the highest production cost. Therefore, increasing the silica fume content in SCC with a constant fly ash substitution of 20% improved mechanical performance and reduced water absorption, but also increased production costs.

Keywords | ***Self-Compacting Concrete, Silica Fume, Fly Ash, Concrete Compressive Strength, Water Absorption***

1. PENDAHULUAN

Beton merupakan material konstruksi yang banyak digunakan dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki kuat tekan yang baik, bahan penyusun yang mudah diperoleh, serta dapat dibentuk sesuai kebutuhan struktur. Seiring dengan perkembangan teknologi konstruksi, penggunaan beton tidak hanya dituntut untuk memenuhi persyaratan kekuatan, tetapi juga harus memiliki kemudahan pengerjaan dan durabilitas yang baik. Dalam industri beton pracetak (*precast*), pengendalian mutu dan efisiensi proses produksi menjadi aspek penting karena elemen beton dicetak dalam kondisi terkontrol sebelum dipasang di lokasi proyek (Prasetyo et al., 2024). Salah satu teknologi yang dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah *Self-Compacting Concrete* (SCC), yaitu beton yang mampu mengalir, mengisi bekisting, dan memadat dengan beratnya sendiri tanpa memerlukan pemadatan mekanis menggunakan *vibrator* (EFNARC, 2005).

Pengembangan SCC memerlukan pengendalian komposisi campuran agar beton segar memiliki kemampuan mengalir dan mengisi ruang dengan baik tanpa mengalami segregasi maupun *bleeding*. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan adalah pemanfaatan bahan tambah mineral dan bahan substitusi semen. Penggunaan material tersebut berpotensi memperbaiki karakteristik beton segar maupun beton yang telah mengeras, bergantung pada karakteristik material dan proporsi yang digunakan (Ratu et al., 2024). Selain mempertimbangkan aspek teknis, pengembangan beton juga perlu memperhatikan dampak lingkungan karena produksi semen Portland berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida global. Oleh karena itu, substitusi sebagian semen menggunakan material alternatif menjadi salah satu upaya untuk mengurangi penggunaan semen dalam campuran beton (Marandi & Shirzad, 2025).

Fly ash merupakan material hasil samping pembakaran batu bara yang mengandung senyawa silika, alumina, dan besi oksida serta memiliki sifat pozzolanik. Dalam campuran beton, *fly ash* dapat berperan sebagai bahan pengisi dan membantu meningkatkan kemudahan pengerjaan beton segar. Namun, pengaruhnya terhadap kuat tekan bergantung pada kadar substitusi dan perkembangan reaksi pozzolanik selama proses pengerasan beton (Prasetyo et al., 2024). Di sisi lain, *silica fume* merupakan material mineral berukuran sangat halus dengan kandungan silika reaktif yang tinggi. Material ini dapat membantu mengisi rongga mikro dan berkontribusi terhadap pembentukan struktur beton yang lebih rapat sehingga berpotensi meningkatkan kuat tekan serta durabilitas beton. Meskipun demikian, penambahan *silica fume* dalam kadar tertentu dapat meningkatkan kebutuhan bahan tambah kimia dan memengaruhi *workability* campuran (Ratu et al., 2024).

Penggunaan *fly ash* dan *silica fume* secara bersamaan berpotensi memberikan kontribusi yang saling melengkapi terhadap kinerja beton SCC. *Fly ash* dapat membantu karakteristik beton segar sekaligus mengurangi kebutuhan semen, sedangkan *silica fume* berpotensi meningkatkan kerapatan mikrostruktur dan kekuatan beton. Penggunaan *fly ash* dan *silica fume* pada SCC memengaruhi kuat tekan beton, dengan hasil yang bergantung pada komposisi campuran dan kondisi perawatan. Penelitian mengenai penyerapan air pada SCC yang mengandung kedua material tersebut juga menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* dan *silica fume* dapat mengurangi penyerapan air dalam kondisi campuran tertentu. Temuan tersebut menunjukkan bahwa evaluasi penggunaan kedua

material perlu mempertimbangkan karakteristik mekanis dan durabilitas beton secara bersamaan.

Meskipun penggunaan *fly ash* dan *silica fume* berpotensi meningkatkan kinerja beton, penentuan komposisi campuran tetap perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kuat tekan, penyerapan air, dan biaya produksi. Penambahan *silica fume* dapat meningkatkan kebutuhan biaya material, sehingga peningkatan kinerja teknis belum tentu menghasilkan campuran dengan biaya paling ekonomis. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini mengkaji beton SCC dengan substitusi *fly ash* sebesar 20% dari total berat bahan pengikat (*cementitious*) dan variasi *silica fume* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi kuat tekan beton pada beberapa umur pengujian, penyerapan air pada umur 28 hari, serta perubahan biaya produksi pada setiap variasi campuran.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini meliputi pengaruh variasi *silica fume* dengan substitusi *fly ash* tetap terhadap kuat tekan beton SCC, pengaruh variasi tersebut terhadap penyerapan air, serta perbandingan biaya produksi beton dengan dan tanpa penambahan *silica fume*. Kajian ini diperlukan untuk mengetahui bagaimana perubahan kadar *silica fume* memengaruhi kinerja beton dan konsekuensi biayanya ketika kadar *fly ash* dipertahankan tetap. Dengan demikian, evaluasi tidak hanya didasarkan pada pencapaian kuat tekan, tetapi juga pada karakteristik penyerapan air dan aspek ekonomi campuran beton.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan *silica fume* pada campuran beton SCC dengan substitusi *fly ash* tetap sebesar 20% terhadap kuat tekan dan penyerapan air, serta membandingkan biaya produksi beton pada setiap variasi campuran. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi bahan pertimbangan dalam menentukan komposisi beton SCC yang memenuhi kinerja teknis sekaligus mempertimbangkan efisiensi biaya. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan material beton yang memanfaatkan bahan substitusi semen sebagai salah satu upaya mengurangi penggunaan semen Portland.

2. KAJIAN PUSTAKA

A. Beton Self-Compacting Concrete (SCC)

Self-Compacting Concrete (SCC) merupakan jenis beton yang memiliki kemampuan mengalir dan memadat dengan memanfaatkan beratnya sendiri tanpa memerlukan pemadatan mekanis menggunakan alat penggetar (*vibrator*). Beton SCC dirancang agar mampu mengisi seluruh bagian *bekisting* dan melewati celah tulangan yang rapat tanpa mengalami segregasi maupun *bleeding*. Berdasarkan EFNARC (2005), karakteristik utama beton SCC meliputi *filling ability*, yaitu kemampuan mengisi ruang *bekisting*; *passing ability*, yaitu kemampuan melewati celah sempit atau tulangan; serta *segregation resistance*, yaitu kemampuan mempertahankan keseragaman campuran beton segar.

Pencapaian karakteristik tersebut memerlukan perencanaan campuran yang tepat, terutama dalam pengaturan jumlah material halus, rasio air terhadap bahan pengikat, dan penggunaan bahan tambah kimia berupa superplasticizer. Selain itu, material mineral seperti *fly ash* dan *silica fume* dapat digunakan sebagai bahan substitusi sebagian semen untuk memengaruhi karakteristik beton segar maupun beton yang telah mengeras.

B. Fly Ash

Fly ash merupakan material sisa pembakaran batu bara yang banyak dimanfaatkan sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton. Material ini mengandung senyawa seperti silika dan alumina yang dapat berkontribusi terhadap

reaksi pozzolanik. Menurut Prasetyo et al. (2024), *fly ash* dapat berfungsi sebagai material pengisi (*filler*) karena ukuran partikelnya yang halus, sehingga berpotensi membantu memperbaiki susunan partikel dalam campuran beton. Penggunaannya pada beton SCC juga dapat meningkatkan kemudahan pengerjaan (*workability*) apabila komposisi campuran direncanakan dengan tepat.

Meskipun demikian, pengaruh *fly ash* terhadap kekuatan beton bergantung pada karakteristik material dan proporsi penggunaannya. Penggunaan dalam jumlah yang tidak sesuai dapat memengaruhi perkembangan kuat tekan beton. Oleh karena itu, pemanfaatan *fly ash* perlu mempertimbangkan keseimbangan antara karakteristik beton segar dan beton yang telah mengeras (Prasetyo et al., 2024).

C. Silica Fume

Silica fume merupakan material hasil samping industri silikon yang memiliki ukuran partikel sangat halus dan kandungan silika yang tinggi. Material ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan substitusi sebagian semen dalam campuran beton. Menurut Ratu et al. (2024), penggunaan *silica fume* pada beton SCC berpotensi meningkatkan kerapatan mikrostruktur dan kuat tekan beton melalui kontribusi partikel halus serta reaksi silika reaktif. Partikel yang halus dapat membantu mengisi ruang di antara material penyusun beton, sehingga susunan internal beton menjadi lebih rapat.

Di sisi lain, penambahan *silica fume* dalam kadar tertentu dapat meningkatkan kebutuhan air atau bahan tambah kimia untuk mempertahankan kemudahan pengerjaan beton segar. Oleh sebab itu, penggunaannya perlu disesuaikan dengan karakteristik material dan perencanaan campuran agar kemampuan mengalir beton SCC tetap terpenuhi (Ratu et al., 2024).

D. Uji Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton merupakan kemampuan beton dalam menahan beban tekan maksimum hingga mengalami keruntuhan. Pengujian kuat tekan menjadi salah satu parameter penting untuk mengevaluasi mutu beton dan mengetahui kesesuaian hasil campuran terhadap kuat tekan yang direncanakan. Berdasarkan SNI 1974:2011, pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan memberikan beban tekan pada benda uji hingga mencapai beban maksimum. Nilai kuat tekan diperoleh dari perbandingan antara beban maksimum yang diterima benda uji dan luas penampang yang menahan beban tersebut.

E. Uji Penyerapan Air Beton

Penyerapan air beton merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan beton mengabsorpsi air melalui pori-pori yang dapat diakses oleh air. Besarnya penyerapan air berkaitan dengan karakteristik pori dan kerapatan struktur internal beton. Pengujian ini dapat digunakan untuk membandingkan karakteristik beton yang dihasilkan dari variasi campuran yang berbeda. Nilai penyerapan air dihitung berdasarkan pertambahan massa benda uji setelah proses perendaman dibandingkan dengan massa benda uji dalam kondisi kering oven.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental laboratorium dengan desain komparatif antarvariasi campuran. Variabel bebas berupa persentase *silica fume* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%, variabel kontrol berupa substitusi *fly ash* tetap sebesar 20% dari total berat bahan pengikat (*cementitious*), serta *superplasticizer* sebesar 0,8%. Variabel terikat meliputi nilai *slump flow*, kuat tekan beton pada umur 8–10 jam, 7, 14, dan 28 hari, serta penyerapan air pada umur 28 hari.

Perencanaan proporsi campuran beton mengacu pada SNI 03-2834:2000 dengan persyaratan beton SCC berdasarkan EFNARC (2005), target mutu ($f'_c = 28$) MPa (K-350).

Variasi	Campuran
V1	SF 0% + FA 20%
V2	SF 5% + FA 20%
V3	SF 10% + FA 20%
V4	SF 15% + FA 20%

Tabel 1. Variasi Campuran

UJI KUAT TEKAN				UJI PENYERAPAN	BAHAN TAMBAH		KEBUTUHAN BAHAN CEMENTITIOUS				AGREGAT			AIR	SP
8 - 10	7	14	28	28	SF		FA + SEMEN				HALUS	KASAR (kg)		(lt)	0,8%
JAM	HARI	HARI	HARI	HARI	%	kg	%	kg	%	kg	kg	Split 5-12	Split 10-20		
3	3	3	3	3	0%	0	20%	93,2	80%	372,8	978	320,4	480,6	120	3,73
3	3	3	3	3	5%	23,3	20%	93,2	80%	372,8	978	320,4	480,6	120	3,73
3	3	3	3	3	10%	46,6	20%	93,2	80%	372,8	978	320,4	480,6	120	3,73
3	3	3	3	3	15%	69,9	20%	93,2	80%	372,8	978	320,4	480,6	120	3,73
Total benda uji kuat tekan				48		Total benda uji penyerapan air				12					

Tabel 2 Mix Design

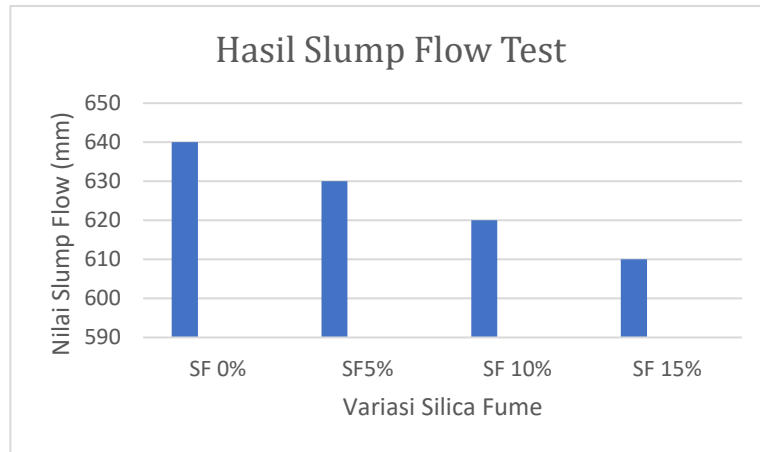
Sebelum digunakan, *silica fume* melalui proses pra-perlakuan dan uji homogenitas menggunakan ayakan No.325. Hasil Uji homogenitas menunjukkan rata-rata lolos saringan 91,88% dengan persyaratan minimal lolos saringan 90,00%. *Fly ash* rata-rata lolos saringan 82,60% dengan persyaratan minimal lolos saringan 66,00%.

Benda uji yang dibuat meliputi 48 buah silinder 150×300 mm untuk pengujian kuat tekan sebanyak 3 benda uji per variasi per umur, serta 12 buah silinder 150×300 mm untuk pengujian penyerapan air sebanyak 3 benda uji per variasi. Total benda uji kuat tekan dan benda uji penyerapan air adalah 60 buah.

Pengujian *workability* dilakukan menggunakan *slump flow test* untuk mengetahui kemampuan alir beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) dengan mengacu pada EFNARC (2005). Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 8–10 jam, 7, 14, dan 28 hari sesuai SNI 1974:2011 menggunakan *Compression Testing Machine*. Pengujian penyerapan air dilakukan pada umur 28 hari dengan mengacu pada ASTM C642 melalui metode pengeringan oven dan perendaman benda uji. Seluruh benda uji dirawat (*curing*) dengan metode perendaman dalam air sesuai dengan umur pengujian masing-masing.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Slump Flow Test



Gambar 1. Hasil Slump Flow Test

Berdasarkan hasil pengujian *slump flow*, dapat diketahui bahwa nilai kemampuan alir (*flowability*) beton mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase penambahan *silica fume*. Nilai *slump flow* menurun dari 640 mm pada campuran SF 0% menjadi 610 mm pada campuran SF 15%, atau mengalami penurunan sebesar 30 mm (4,69%).

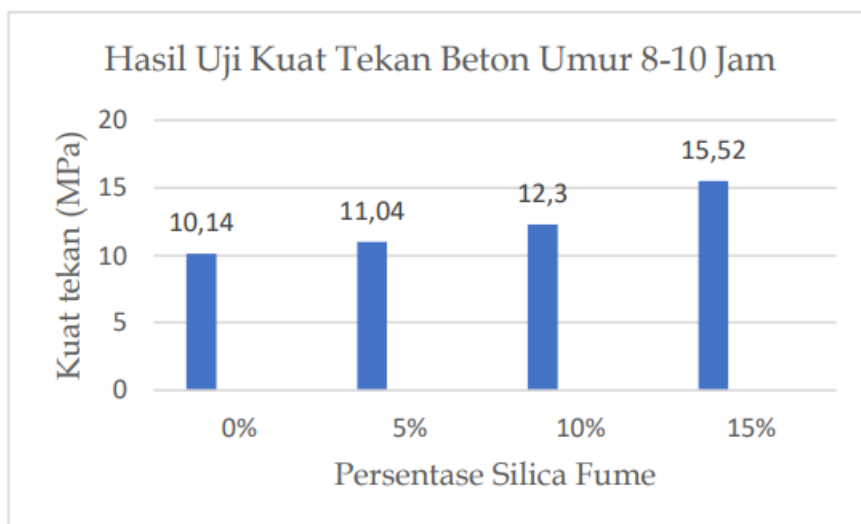
Penurunan terjadi secara konsisten, yaitu sebesar 10 mm pada setiap peningkatan kadar *silica fume* sebesar 5%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *silica fume* cenderung mengurangi kemampuan alir beton karena ukuran partikelnya yang sangat halus dan memiliki luas permukaan tinggi sehingga membutuhkan lebih banyak air untuk membasahi partikel.

Meskipun demikian, seluruh variasi campuran masih menghasilkan nilai *slump flow* dalam rentang 550–650 mm yang sesuai untuk beton *Self-Compacting Concrete* (SCC). Dengan demikian, penggunaan *silica fume* hingga 15% pada campuran dengan *fly ash* 20% masih mampu mempertahankan karakteristik *flowability* beton SCC, meskipun terjadi penurunan kemampuan alir seiring bertambahnya kadar *silica fume*.

B. Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Umur Beton 8-10 Jam						
Campuran		Benda Uji	Penampang	Hasil		Rata-tata
SF	FA		(cm ²)	kN	MPa	
0%	20%	(0%)1	176,71	169,5	9,59	10,14
		(0%)2	176,71	175,8	9,95	
		(0%)3	176,71	192,3	10,88	
5%		(5%)1	176,71	202,1	11,23	11,04
		(5%)2	176,71	192,6	10,90	
		(5%)3	176,71	194,2	10,99	
10%		(10%)1	176,71	218,1	12,34	12,30
		(10%)2	176,71	214,0	12,10	
		(10%)3	176,71	220,2	12,46	
15%		(15%)1	176,71	274,5	15,53	15,52
		(15%)2	176,71	269,7	15,26	
		(15%)3	176,71	278,6	15,76	

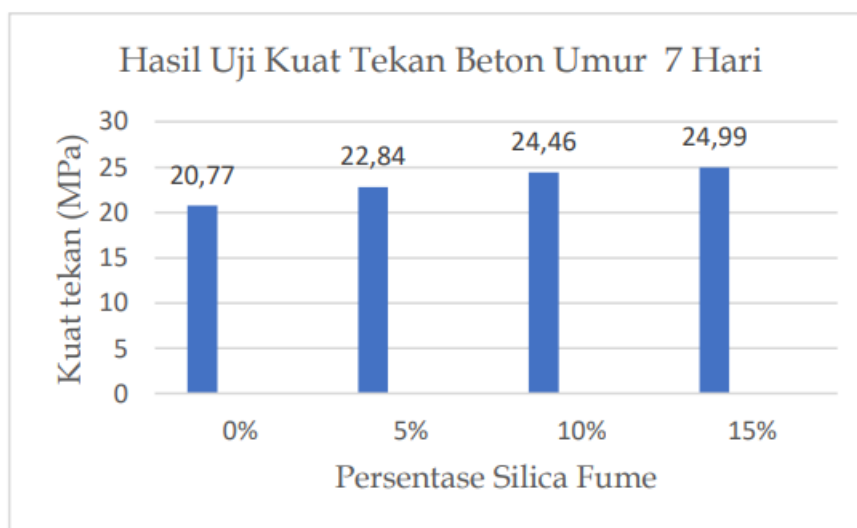
Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 8 Jam



Gambar 2. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 8 Jam

Umur Beton 7 Hari						
Campuran		Benda Uji	Penampang	Hasil		Rata-tata
SF	FA		(cm ²)	kN	MPa	
0%	20%	(0%)1	176,71	366,6	20,73	20,77
		(0%)2	176,71	366,4	20,68	
		(0%)3	176,71	369,5	20,91	
5%		(5%)1	176,71	414,5	23,08	22,84
		(5%)2	176,71	389,9	22,04	
		(5%)3	176,71	413,4	23,40	
10%		(10%)1	176,71	434,4	24,58	24,46
		(10%)2	176,71	432,2	24,46	
		(10%)3	176,71	430,5	24,33	
15%		(15%)1	176,71	442,0	25,01	24,99
		(15%)2	176,71	447,3	25,31	
		(15%)3	176,71	435,6	24,65	

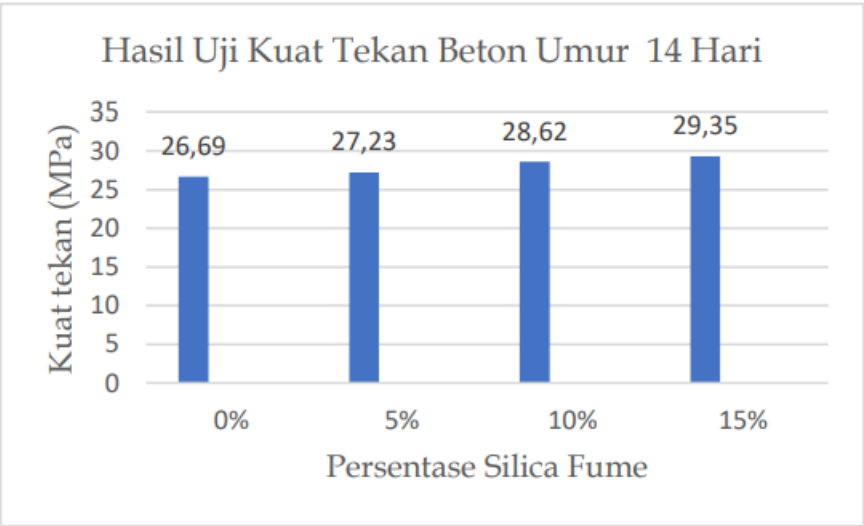
Tabel 4. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 7 Hari



Gambar 3. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 7 Hari

Umur Beton 14 Hari						
Campuran		Benda Uji	Penampang	Hasil		Rata-tata
SF	FA		(cm ²)	kN	MPa	
0%	20%	(0%)1	176,71	470,2	26,53	26,69
		(0%)2	176,71	474,2	26,84	
		(0%)3	176,71	471,8	26,70	
5%		(5%)1	176,71	482,9	27,23	27,23
		(5%)2	176,71	490,9	27,63	
		(5%)3	176,71	474,6	26,83	
10%		(10%)1	176,71	518,0	29,19	28,62
		(10%)2	176,71	500,5	28,32	
		(10%)3	176,71	501,0	28,35	
15%		(15%)1	176,71	523,7	29,64	29,35
		(15%)2	176,71	510,7	28,90	
		(15%)3	176,71	521,3	29,50	

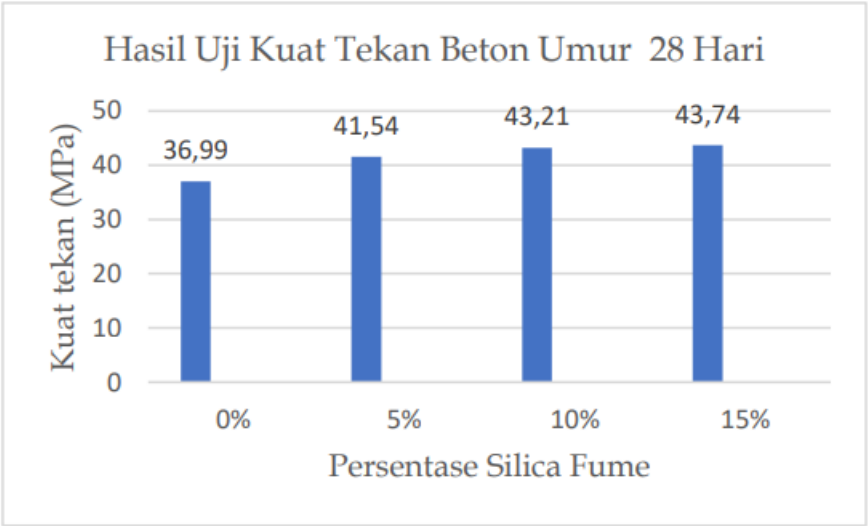
Tabel 5. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 14 Hari



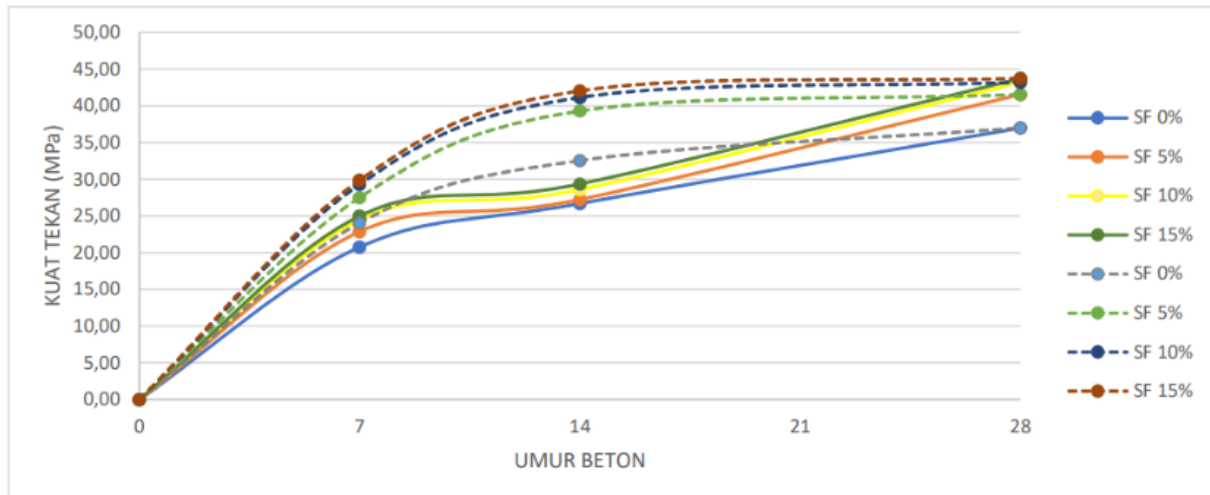
Gambar 4. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 14 Hari

Umur Beton 28 Hari						
<u>Campuran</u>		Benda Uji	<u>Penampang</u>	Hasil		Rata-tata
SF	FA		(cm ²)	<u>kN</u>	MPa	
0%	20%	(0%)1	176,71	656,2	37,11	36,99
		(0%)2	176,71	647,1	36,62	
		(0%)3	176,71	658,1	37,24	
5%		(5%)1	176,71	736,5	41,60	41,54
		(5%)2	176,71	732,5	41,45	
		(5%)3	176,71	734,6	41,57	
10%		(10%)1	176,71	765,0	43,29	43,21
		(10%)2	176,71	755,5	42,75	
		(10%)3	176,71	770,3	43,59	
15%		(15%)1	176,71	772,0	43,68	43,74
		(15%)2	176,71	759,9	43,00	
		(15%)3	176,71	707,1	44,54	

Tabel 6. Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari



Gambar 5. Grafik Hasil Uji Kuat Tekan Beton Umur 28 Hari



Gambar 6. Grafik Kuat Tekan Keseluruhan

Grafik di atas menunjukkan bahwa kuat tekan beton pada seluruh variasi mengalami peningkatan seiring bertambahnya umur beton, mulai dari umur 7 - 28 hari. Akan tetapi, peningkatan kuat tekan beton tersebut belum sesuai dengan target kuat tekan menurut PBI 1971, dimana pada pengujian kuat tekan umur 7 hari masih di bawah target 65% dan pengujian kuat tekan umur 14 hari masih di bawah target 88%, sehingga ditambahkan grafik sesuai dengan kuat tekan yang ditargetkan. Meskipun demikian, pola tersebut menunjukkan perkembangan kuat tekan sebagai akibat dari proses hidrasi semen dan berlangsungnya reaksi pozzolan pada campuran yang mengandung *silica fume*. Variasi dengan penambahan *silica fume* menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan campuran kontrol (*silica fume* 0%).

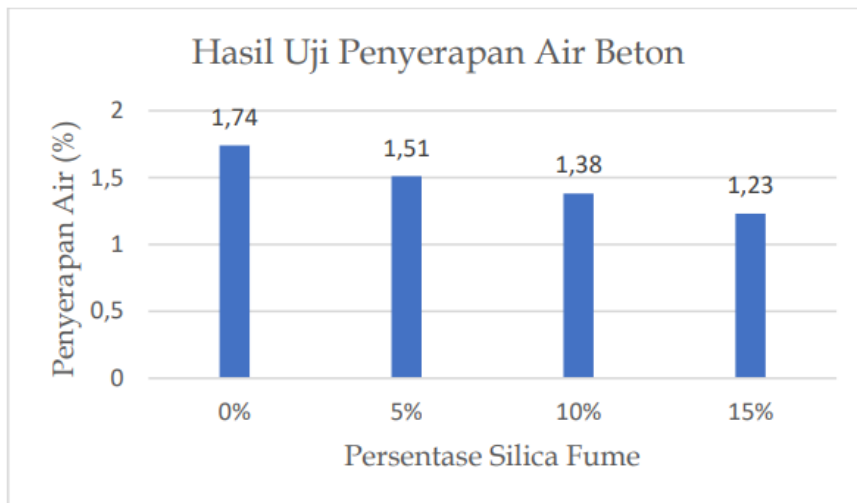
Peningkatan kuat tekan tersebut berkaitan dengan terbentuknya senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai produk utama hidrasi semen. Kandungan silika (SiO_2) aktif dalam *silica fume* dapat bereaksi secara pozzolanik dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) yang dihasilkan selama proses hidrasi semen. Reaksi tersebut menghasilkan tambahan gel C-S-H yang berperan dalam mengisi rongga dan memperbaiki kepadatan struktur pasta semen. Semakin padat matriks beton yang terbentuk, semakin baik pula kemampuan beton dalam menerima beban tekan.

Meskipun demikian, peningkatan kuat tekan tidak selalu berbanding lurus dengan bertambahnya persentase penambahan *silica fume*. Pada kadar penambahan yang lebih tinggi, jumlah semen yang tersedia dalam campuran semakin berkurang sehingga ketersediaan Ca(OH)_2 sebagai salah satu reaktan dalam reaksi pozzolan juga menjadi lebih terbatas. Kondisi tersebut menyebabkan efektivitas penambahan *silica fume* dalam meningkatkan kuat tekan menjadi semakin terbatas. Hal ini terlihat pada variasi *silica fume* 15% yang memiliki perbedaan nilai kuat tekan relatif kecil meskipun persentase substitusinya meningkat. Dengan demikian, pembentukan gel C-S-H tambahan tetap memberikan kontribusi terhadap peningkatan kepadatan dan kekuatan matriks beton, meskipun keterbatasan ketersediaan Ca(OH)_2 dan berkurangnya proporsi semen dalam campuran.

C. Hasil Uji Penyerapan Air

VARIASI SF	BENDA UJI	m0 (kg)	m1 (kg)	Penyerapan Air (%)
		Setelah Rendam	Setelah Oven	$[(m0-m1)/m1] \times 100\%$
0%	1	13,49	13,26	1,73
	2	13,45	13,22	1,74
	3	13,41	13,18	1,75
	Rata-rata			1,74
5%	1	13,40	13,20	1,52
	2	13,36	13,16	1,52
	3	13,32	13,12	1,51
	Rata-rata			1,51
10%	1	13,29	13,11	1,37
	2	13,25	13,07	1,38
	3	13,22	13,04	1,38
	Rata-rata			1,38
15%	1	13,19	13,03	1,23
	2	13,17	13,1	1,23
	3	13,14	12,98	1,23
	Rata-rata			1,23

Tabel 7. Hasil Uji Penyerapan Air



Gambar 7. Grafik Hasil Uji Penyerapan Air

Berdasarkan tabel dan grafik hasil penyerapan air di atas, nilai penyerapan air beton menunjukkan penurunan dari variasi penambahan *silica fume* 0% hingga 15%. Penyerapan air terendah terdapat pada variasi penambahan *silica fume* 15% dengan nilai 1,23%, sedangkan variasi kontrol (*silica fume* 0%) menunjukkan penyerapan air tertinggi sebesar 1,74%. Penurunan nilai penyerapan air pada setiap variasi menunjukkan bahwa reaksi pozzolan yang berlangsung antara kandungan SiO₂ aktif dalam *silica fume* dan Ca(OH)₂ menghasilkan tambahan gel C-S-H. Gel tersebut berperan dalam mengisi dan memperkecil pori-pori kapiler pada matriks beton, sehingga struktur beton menjadi lebih padat dan kemampuan beton dalam menyerap air mengalami penurunan. Secara keseluruhan, nilai penyerapan air pada seluruh variasi berada pada rentang yang relatif rendah dan seragam, yaitu sebesar 1,23%–1,74%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa penambahan *silica fume* dan substitusi *fly ash* dalam campuran tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap penurunan kekedapan beton.

a. Hasil Analisis Biaya

RENCANA ANGGARAN BIAYA						
TRIAL MIX K350 SCC						
A. IDENTITAS TRIAL MIX						
Class/Grade		K350 SCC SF 5%				
Volume rencana		1m ³				
B. KEBUTUHAN BAHAN						
No	Material			Volume	Unit	Total
1	Cement	Type 1	SIG	372,8	Kg/m3	Rp 447.360,00
2	Fly Ash	Type F	Java power	93,2	kg/m3	Rp 93.200,00
3	Water	-	PDAM	120	Kg/m3	Rp 312,00
4	Pasir 1	-	Lumajang	978	Kg/m3	Rp 156.831,30
6	Coarse agregat	10-20	Pasuruan	480,6	Kg/m3	Rp 75.119,83
7	Coarse agregat	5-10	Pasuruan	320,4	Kg/m3	Rp 64.397,70
9	Additive	P191	Consol	3,73	Kg/m3	Rp 103.507,50
10	Bahan tambah	Silica fume	Consol	23,3	Kg/m3	Rp 294.745,00
Total						Rp 1.235.473,33
Dibulatkan						Rp 1.235.474,00

Tabel 8. Anggaran Biaya Beton SCC K350 Silica Fume 5%

RENCANA ANGGARAN BIAYA						
TRIAL MIX K350 SCC						
A. IDENTITAS TRIAL MIX						
Class/Grade		K350 SCC SF 10%				
Volume rencana		1m ³				
B. KEBUTUHAN BAHAN						
No	Material			Volume	Unit	Total
1	Cement	Type 1	SIG	372,8	Kg/m ³	Rp 447.360,00
2	Fly Ash	Type F	Java power	93,2	kg/m ³	Rp 93.200,00
3	Water	-	PDAM	120	Kg/m ³	Rp 312,00
4	Pasir 1	-	Lumajang	978	Kg/m ³	Rp 156.831,30
6	Coarse agregat	10-20	Pasuruan	480,6	Kg/m ³	Rp 75.119,83
7	Coarse agregat	5-10	Pasuruan	320,4	Kg/m ³	Rp 64.397,70
9	Additive	P191	Consol	3,73	Kg/m ³	Rp 103.507,50
10	Bahan tambah	Silica fume	Consol	46,6	Kg/m ³	Rp 589.490,00
Total						Rp 1.530.218,33
Dibulatkan						Rp 1.530.219,00

Tabel 9. Anggaran Biaya Beton SCC K350 Silica Fume 10%

A. IDENTITAS TRIAL MIX						
Class/Grade		K350 SCC SF 15%				
Volume trial		1m ³				
B. KEBUTUHAN BAHAN						
No	Material			Volume	Unit	Total
1	Cement	Type 1	SIG	372,8	Kg/m ³	Rp 447.360,00
2	Fly Ash	Type F	Java power	93,2	kg/m ³	Rp 93.200,00
3	Water	-	PDAM	120	Kg/m ³	Rp 312,00
4	Pasir 1	-	Lumajang	978	Kg/m ³	Rp 156.831,30
6	Coarse agregat	10-20	Pasuruan	480,6	Kg/m ³	Rp 75.119,83
7	Coarse agregat	5-10	Pasuruan	320,4	Kg/m ³	Rp 64.397,70
9	Additive	P191	Consol	3,73	Kg/m ³	Rp 103.507,50
10	Bahan tambah	Silica fume	Consol	69,9	Kg/m ³	Rp 884.235,00
Total						Rp 1.824.963,33
Dibulatkan						Rp 1.824.964,00

Tabel 10. Anggaran Biaya Beton SCC K350 Silica Fume 15%

A. IDENTITAS TRIAL MIX						
Class/Grade		K350 SCC SF 0%				
Volume trial		1m ³				
B. KEBUTUHAN BAHAN						
No	Material			Volume	Unit	Total
1	Cement	Type 1	SIG	372,8	Kg/m ³	Rp 447.360,00
2	Fly Ash	Type F	Java power	93,2	kg/m ³	Rp 93.200,00
3	Water	-	PDAM	120	Kg/m ³	Rp 312,00
4	Pasir 1	-	Lumajang	978	Kg/m ³	Rp 156.831,30
6	Coarse agregat	10-20	Pasuruan	480,6	Kg/m ³	Rp 75.119,83
7	Coarse agregat	5-10	Pasuruan	320,4	Kg/m ³	Rp 64.397,70
9	Additive	P191	Consol	3,73	Kg/m ³	Rp 103.507,50
10	Bahan tambah	Silica fume	Consol	0	Kg/m ³	Rp -
Total						Rp 940.728,33
Dibulatkan						Rp 940.729,00

Tabel 11. Anggaran Biaya Beton SCC K350 Silica Fume 0%

Berdasarkan hasil perhitungan biaya pada tabel, terlihat bahwa total biaya pembuatan beton meningkat seiring dengan bertambahnya persentase *silica fume*. Pada variasi *silica fume* 0%, total biaya yang diperlukan sebesar Rp940.729,00. Biaya tersebut meningkat menjadi Rp1.235.474,00 pada variasi 5%, Rp1.530.219,00 pada variasi 10%, dan mencapai Rp1.824.964,00 pada variasi 15%. Peningkatan biaya tersebut menunjukkan bahwa semakin besar persentase *silica fume* yang digunakan dalam campuran, semakin besar pula biaya material yang diperlukan. Dibandingkan dengan beton kontrol (*silica fume* 0%), penggunaan *silica fume* sebesar 5%, 10%, dan 15% masing-masing meningkatkan total biaya sekitar 31,32%, 62,64%, dan 94,00%. Kenaikan biaya yang relatif konsisten pada setiap peningkatan kadar *silica fume* menunjukkan bahwa biaya material *silica fume* memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap total biaya campuran.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai inovasi beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) dengan penambahan *silica fume* dan substitusi *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen, dapat disimpulkan dari penelitian ini sebagai berikut:

- A. Penambahan *silica fume* sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15% dengan substitusi *fly ash* tetap sebesar 20% dari total berat *cementitious* berpengaruh terhadap peningkatan kuat tekan beton *Self-Compacting Concrete* (SCC). Pada umur 28 hari, kuat tekan beton meningkat dari 36,99 MPa pada variasi *silica fume* 0% menjadi 41,54 MPa pada variasi 5%, 43,21 MPa pada variasi 10%, dan 43,74 MPa pada variasi 15%. Peningkatan tersebut masing-masing sebesar 12,3%, 16,8%, dan 18,2% dibandingkan campuran kontrol. Seluruh variasi telah melampaui kuat tekan rencana sebesar 28 MPa, dengan kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi *silica fume* 15%.
- B. Penambahan *silica fume* juga menunjukkan kecenderungan menurunkan nilai penyerapan air beton SCC. Pada umur 28 hari, nilai penyerapan air berkurang dari 1,74% pada variasi *silica fume* 0% menjadi 1,51% pada variasi 5%, 1,38% pada variasi 10%, dan 1,23% pada variasi 15%. Penurunan ini berkaitan dengan kontribusi reaksi pozzolanik dan efek pengisian partikel halus *silica fume* yang membantu memampatkan matriks beton serta memperkecil pori-pori kapiler. Seluruh variasi menghasilkan penyerapan air di bawah 2%, dengan nilai terendah pada variasi *silica fume* 15%. Selain itu, nilai *slump flow* menurun dari 640 mm pada variasi 0% menjadi 610 mm pada variasi 15%, tetapi seluruh variasi masih berada dalam rentang target SCC sebesar 550–650 mm.
- C. Penambahan *silica fume* menyebabkan peningkatan biaya pembuatan beton SCC per m³. Biaya pada variasi *silica fume* 0% sebesar Rp940.729,00, kemudian meningkat menjadi Rp1.235.474,00 pada variasi 5%, Rp1.530.219,00 pada variasi 10%, dan Rp1.824.964,00 pada variasi 15%. Dibandingkan campuran kontrol, kenaikan biaya tersebut masing-masing sebesar 31,32%, 62,64%, dan 94,00%. Peningkatan biaya terutama berkaitan dengan bertambahnya kebutuhan material *silica fume* dalam campuran. Dengan demikian, variasi 15% menghasilkan kinerja terbaik berdasarkan kuat tekan dan penyerapan air, tetapi juga memiliki biaya pembuatan tertinggi. Pemilihan komposisi beton perlu mempertimbangkan kebutuhan kinerja teknis dan efisiensi biaya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International. (2005). *Standard specification for silica fume used in cementitious mixtures* (ASTM C1240-05).
- ASTM International. (2006). *Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete* (ASTM C642-06).
- ASTM International. (2021). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete* (ASTM C618-21).
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000: *Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 1974:2011: *Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). SNI 2460:2014: *Spesifikasi abu terbang batu bara dan pozzolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton*.

Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019: *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan*. Badan Standardisasi Nasional.

EFNARC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete*. EFNARC.

Kandou, C., & Tumengkol, H. (2025). *Development of high-performance concrete with advanced materials for sustainable building applications*. 15(2), 21482–21487.

Lakhiar, M. T., Mohamad, N., Aziz, A., Samad, A., Muthusamy, K., Mydin, A. O., & Goh, W. I. (2021). Effect of banana skin powder and coir fibre on properties and flexural behaviour of precast SCC beam. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(5), 1193–1206.

Marandi, N., & Shirzad, S. (2025). *Sustainable cement and concrete technologies: A review of materials and processes for carbon reduction*.

Prasetyo, F. R., Intan, A., & Diana, N. (2024). *Semen terhadap kuat tekan beton self-compacting concrete (SCC)*. 08, 20–29.

Ratu, C., Tanijaya, J., & Sandy, D. (2024). *Penggunaan silika fume dan viscocrete sebagai bahan tambah pada beton SCC (Self-Compacting Concrete)*. 6(4), 619–627.