

Analisis Serangan Sulfat pada *Self Compacting Concrete* (SCC) menggunakan Variasi Penambahan *Silica fume* dengan Metode Perubahan Panjang

Mochamad Solikin^{1*}, Budi Setiawan¹, Iqbal Rahmad Afani¹, Habdan Rizki Perdana¹, Nindya Sabrina¹, Rois Fatoni² dan Indah Pratiwi³

¹ Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia 57169

² Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia 57169

³ Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia 57169

* penulis koresponden: msolikin@ums.ac.id

Abstrak: Beton adalah salah satu material yang sering dijumpai pada struktur konstruksi. Hal ini menjadikan beton harus memiliki ketahanan terhadap kondisi lingkungan sekitar, baik dalam kondisi kering maupun basah. Tak sedikit di lingkungan sekitar terdapat bahan agresif seperti sulfat yang dapat menurunkan durabilitas dan sifat mekanis beton. Dalam rangka mengatasi permasalahan tersebut, maka dalam penelitian ini dilakukan kajian penggunaan bahan tambah *silica fume* untuk meningkatkan ketahanan pada beton terhadap serangan sulfat. Dalam penelitian ini, rancangan campuran beton dibuat menurut metode ACI dengan kuat tekan rencana 25 MPa. Pengujian ketahanan beton terhadap serangan sulfat dilakukan dengan perendaman benda uji siklus kering-basah pada larutan *Sodium Sulfate* (Na_2SO_4) dengan konsentrasi 5% dengan variasi penambahan *silica fume* 0%, 8%, dan 10%. Benda uji kuat tekan dan kehilangan berat setelah perendaman dengan larutan sulfat berupa silinder beton berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Sedangkan untuk pengujian perubahan panjang menggunakan benda uji balok mortar dimensi 285 mm x 25 mm x 25 mm. Hasil pengujian didapatkan kadar optimum penambahan *silica fume* sebesar 8% pada beton dengan perendaman larutan sulfat yang berkontribusi meningkatkan nilai kuat tekan beton sebesar 44,91% dan mengurangi efek ekspansi pada mortar hingga 53,39%, sedangkan kadar 10% mengurangi kehilangan berat hingga 0,15% dibandingkan beton tanpa bahan tambah *silica fume*.

Kata kunci: *expansion*; kuat tekan beton; mortar; *self compacting concrete*; *silica fume*; *weight loss*; *sulphate*

Diterima: 25 Januari 2024
Diperbaiki: 16 April 2024
Disetujui: 23 April 2024

1. Pendahuluan

Beton adalah salah satu bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam beberapa tahun terakhir [1]. Beton menjadi pilihan utama karena murah, mudah didapat, mudah dikerjakan, kuat dan mudah dibentuk dalam pelaksanaan pekerjaan di lapangan [2]. Berbagai bangunan dan infrastruktur seperti dermaga, jembatan, dan dinding penahan tanah sebagian besar terbuat dari beton. Salah satu penyebab utama kerusakan beton adalah paparan bahan kimia berbahaya dalam bentuk larutan baik berupa air tanah maupun air laut. Di antara bahan kimia agresif yang ditemukan, sulfat dan klorida

dilaporkan sebagai ion paling agresif yang mempengaruhi daya tahan struktur beton [3].

Pada umumnya, beton mengalami kerusakan disebabkan oleh adanya paparan zat kimia yang dapat ditemukan di kondisi kering maupun basah. Salah satu kerusakan tersebut dapat berupa serangan sulfat yang ditimbulkan oleh adanya kandungan sulfat di sekitar beton.

Serangan sulfat dapat menyebabkan ekspansi, retak, pengelupasan, dan kegagalan struktur [3]. Serangan sulfat menunjukkan dengan retak dan pengelupasan beton disertai dengan pemuaihan dan atau kehilangan kekuatan yang mempengaruhi ketahanan beton. Ketahanan beton terhadap serangan sulfat ditentukan oleh beberapa faktor, antara lain rasio air-semen, permeabilitas, dan karakteristik semen meliputi kehalusan dan komposisi semen [4].

Secara umum, larutan sulfat mempengaruhi mortar semen lebih agresif dibandingkan larutan kapur. Oleh karena itu telah dikembangkan pengujian ketahanan mortar terhadap serangan sulfat di laboratorium menggunakan metode perubahan panjang (*length change*) yang termaktub dalam ASTM C1012 [5]. Dilaporkan bahwa semen yang mengandung lebih banyak C_3A lebih tahan terhadap serangan sulfat [6]. Aspek utama mengenai ketahanan beton adalah ketahanan terhadap serangan ion sulfat. Jika terkena air yang mengandung ion sulfat akan terbentuk ettringit ($Ca_6(Al,Fe)_2(SO_4)_3(OH)_{12}\cdot 26H_2O$), gypsum ($CaSO_4\cdot 2H_2O$) dan atau thaumasite ($Ca_3Si(OH)_6(CO_3)(SO_4)\cdot 12H_2O$) dapat menyebabkan perubahan matriks semen. Pembentukan ettringit dan *gypsum* disertai dengan peningkatan volume mengakibatkan regangan ekspansif pada beton, sehingga menyebabkan keretakan [7].

Dalam perkembangannya, beton dikembangkan dengan harapan mampu mengatasi berbagai permasalahan di lapangan yang dapat menurunkan kemampuan teknis beton dalam memikul beban. Hadirnya beton SCC (*Self Compacting Concrete*) merupakan solusi untuk pengecoran beton di lokasi dengan susunan tulangan yang sangat rapat atau bentuk beton dengan dimensi yang tipis. Beton SCC (*Self Compacting Concrete*) ialah beton yang dapat mengalir dengan sendiri karena beratnya mengikuti bentuk bekisting dan mengikuti arah gravitasi dengan tanpa alat bantu [8]. Selain itu peneliti sebelumnya menyatakan bahwa penambahan *silica fume* memungkinkan peningkatan daya tahan dan sifat pengerasan beton SCC [8]. Daya tahan dan pengerasan beton menjadi faktor yang dipertimbangkan dalam pembuatan beton. Menurut [9] penambahan *silica fume* diyakini mempengaruhi karakteristik beton untuk memperbaiki sifat mekanik beton.

Silica fume terdiri dari silika murni dalam bentuk non-kristal. *Silica fume* memiliki kandungan silikon dioksida amorf yang sangat tinggi dan terdiri dari partikel butir yang sangat halus. Karena kehalusannya dan silikon dioksida amorf yang sangat tinggi, *silica fume* adalah bahan pozzolan yang sangat reaktif [10]. Selanjutnya dilaporkan bahwa penambahan *silica fume* memainkan peran penting dalam ikatan semen dengan partikel agregat. Pengaruh kandungan *silica fume* terhadap kekuatan beton meningkat secara signifikan seperti yang diutarakan oleh [11]. Penelitian sebelumnya juga dilakukan oleh [12] dalam jurnalnya yang menyatakan *silica fume* dapat memperbaiki ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan sebagai perbandingan kinerja *silica fume* lebih baik daripada *fly ash*.

Menurut [13] dalam artikelnya yang mempelajari kerusakan dan mekanisme siklus *dry-wet* dan serangan sulfat terhadap kinerja beton menghasilkan penurunan kuat tekan pada lingkungan agresif dan siklus kering-basah mempercepat erosi sulfat. Dengan meningkatnya siklus kering-basah membuat pori-pori yang besar terisi oleh produk erosi dan berkembang menjadi pori-pori kecil pada tahap awal erosi dan pada tahap erosi selanjutnya memperbesar pori-pori dan retakan terjadi pada benda uji. Penelitian lain juga menunjukkan penurunan kekuatan beton dan ketahanan sulfat secara signifikan. Penurunan kekuatan beton disebabkan oleh kerusakan beton yang dipicu oleh kristalisasi garam pada proses siklus kering-basah [14].

Pada penelitian sebelumnya, banyak peneliti melakukan upaya peningkatan kualitas beton. Menurut [15] salah satu cara untuk memperbaiki kekuatan beton adalah dengan peningkatan kekuatan pasta semen dengan penggunaan *mineral admixtures* berupa *silica fume*. Penggunaan *silica fume* pada

campuran beton dimaksudkan untuk menghasilkan beton dengan kekuatan yang semakin meningkat dari hari ke hari [16]. Akan tetapi untuk peningkatan kualitas beton menggunakan bahan tambah berupa *silica fume* terhadap serangan sulfat masih belum cukup banyak, sehingga mendorong pelaksanaan penelitian mengenai ketahanan beton terhadap serangan sulfat dengan metode basah-kering dan ASTM C 1012 dengan metode *length change*.

Berdasarkan pembahasan di atas, tujuan penelitian ini dimaksudkan meninjau pengaruh pemanfaatan *silica fume* pada kadar yang berbeda pada beton SCC terhadap serangan sulfat. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian karakteristik beton segar (*slump flow test*), serta pengujian kuat tekan, pengujian ekspansi pada keadaan siklus basah-kering, dan kehilangan berat pada umur 28 hari.

2. Metode

Penelitian dilakukan dengan metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta mengenai analisis ketahanan beton *Self Compacting Concrete* (SCC) dengan variasi penambahan *silica fume* terhadap serangan sulfat. Metode perencanaan pencampuran beton menggunakan metode *American Concrete Instituted* (ACI) dengan penyesuaian kadar agregat halus yang lebih tinggi dibandingkan agregat kasar untuk mendapatkan dan menentukan proporsi beton SCC dengan kuat tekan $f_c' = 25$ MPa.

2.1. Material

Bahan material penyusun beton yang digunakan seperti agregat halus, semen, air, *silica fume*, dan *admixture*. *Silica fume* didapat dari PT. Sika Indonesia dengan produk *sikafume*. Spesifikasi dari *sikafume* yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 1**. Material berupa agregat halus berasal dari PT. Solusi Bangun Beton, Yogyakarta. Semen yang digunakan berasal dari PT. Seloprogo Sakti, Klaten sedangkan agregat kasar didapatkan dari PT. Pancadharmas Beton, Karanganyar. Semua bahan tersebut dilakukan uji kualitas material dengan hasil memenuhi sehingga dapat digunakan untuk campuran adukan beton. Proporsi campuran beton ditunjukkan **Tabel 2** dan proporsi campuran mortar ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 1. Spesifikasi *sikafume*

Komposisi	Campuran bahan reaktif laten
Pengemasan	Kantong 20 kg 1000 <i>bulk</i>
Penampilan/Warna	Bubuk/abu-abu
Berat Jenis	~0,65 kg/lt
Kandungan ion Klorida total	< 0,3 M-%
Dosis yang direkomendasikan	3-10 % berat semen

Tabel 2. Perencanaan campuran benda uji silinder dan balok

Jenis benda uji	Komposisi Campuran per m ³						SP Aktual (lt)
	Semen (kg)	<i>Silica fume</i> (kg)	Agregat		Air (lt)	Air Aktual (lt)	
			Halus (kg)	Kasar (kg)			
SF0-SCC	404,4	0	1096	641,55	182	160	0
SF8-SCC	404,4	32,35	1096	641,55	182	160	7,862
SF10-SCC	404,4	40,44	1096	641,55	182	160	8,008

Dalam perencanaan proporsi campuran beton SCC ini digunakan ukuran agregat kasar maksimal 20 mm, faktor air-semen (fas) yang dipakai sebesar 0,45, dan pemakaian *Superplasticizer Sika*

Viscocrete 1003 dengan dosis 1,8% agar mendapatkan sifat beton SCC yaitu dapat mengalir dengan berat sendirinya. Variasi pemakaian *silica fume* berupa penambahan dengan kadar 0%, 8%, dan 10% terhadap berat semen, dimana kadar tersebut didasarkan penelitian [12] yang menggunakan kadar *silica fume* antara 5% - 11%.

Tabel 3. Perencanaan campuran benda uji balok mortar

Jenis benda uji	Semen (kg)	<i>Silica fume</i> (kg)	Komposisi Campuran per m ³			Air Aktual (lt)	SP Aktual (lt)
			Agregat		Air (lt)		
			Halus (kg)	Kasar (kg)			
SF0-SCC	404,4	0	1826,78	0	182	160	0
SF8-SCC	404,4	32,36	1826,78	0	182	160	7,862
SF10-SCC	404,4	40,44	1826,78	0	182	160	8,008

*SP = Superplasticizer

2.2. Prosedur Penelitian

Penelitian ini diawali dengan pembuatan benda uji yang terdiri dari benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm untuk menguji kuat tekannya dan kehilangan berat. Sedangkan untuk pengujian ekspansi (perubahan panjang) menggunakan benda uji balok mortar berukuran 285 mm x 25 mm x 25 mm sebagaimana disyaratkan dalam ASTM C1012 [5]. Setelah dilakukan penuangan campuran pada cetakan yang sudah disiapkan, benda uji dikeluarkan dari cetakan setelah 1 hari. Setelah pelepasan dari cetakan, benda uji ditimbang untuk mendapatkan berat awal. Untuk beton yang akan direndam larutan sulfat, terlebih dahulu direndam di air biasa selama 10 hari setelah itu akan dimasukkan ke dalam bak yang berisikan larutan *Sodium Sulfate* (Na_2SO_4) dengan konsentrasi 5% selama 7 hari sebelum kemudian didiamkan di suhu ruangan selama 7 hari. Proses perendaman selama 7 hari kemudian diletakkan di suhu ruangan selama 7 hari disebut satu siklus basah-kering dimana dilakukan pembacaan setiap siklus basah-kering dan didapatkan 3 kali pembacaan data.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian Ikatan Awal Semen

Uji ikat awal semen digunakan untuk menentukan waktu ikat awal semen pada saat digunakan. Pengujian ini dilakukan menggunakan campuran semen dan bahan tambah berupa *silica fume* dengan menggunakan alat uji *Vicat Apparatus* sesuai cara pengujian sebagaimana tercantum pada SNI 15-2049-2004, (2004). Hasil pengujian ikatan awal semen ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian ikatan awal semen

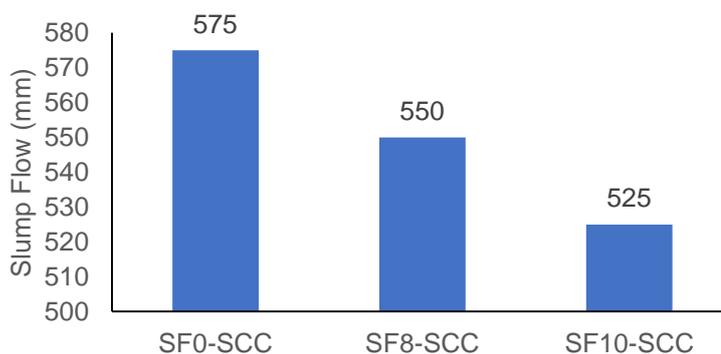
Benda uji	Proporsi	Waktu Penurunan	Spesifikasi
SF0	Semen 100%	61 menit	≥ 45 menit
SF8	Semen 100% + <i>Silica fume</i> 8%	44 menit	-
SF10	Semen 100% + <i>Silica fume</i> 10%	44 menit	-

Hasil pengujian pada **Tabel 4** didapatkan hasil ikatan awal semen pada benda uji *silica fume* dapat meningkatkan waktu ikat awal semen menjadi semakin cepat dibandingkan benda uji tanpa *silica fume*. Meskipun demikian, hasil pengujian waktu ikat awal semen pada kadar penambahan *silica fume* sebesar 8% dengan 10% tidak berbeda yaitu sebesar 44 menit. Percepatan waktu ikatan awal semen tersebut dikarenakan *silica fume* dapat meningkatkan hidrasi pasta secara signifikan sehingga mempercepat ikatan antar pasta semen di awal waktu. Dalam tinjauan reaksi hidrasi pasta semen, pozzolan *silica fume*

bereaksi secara cepat terhadap kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yang merupakan produk hidrasi semen sehingga pasta akan cepat mengeras. Menurut SNI 15-2049-2004, (2004) waktu pengikatan ikatan semen terjadi pada waktu 45-375 menit, sehingga pengujian ikatan awal semen pada penelitian ini memenuhi standar pada pasta semen tanpa bahan tambah. Menurut Siddique & Chahal [10] penambahan *silica fume* mempercepat hidrasi semen portland pada semua tahap hidrasi. Aksi pozzolan dari *silica fume* aktif pada waktu awal hidrasi. Penelitian lain juga dilakukan oleh [17] dengan menggunakan substitusi *silica fume* sebesar 10% memiliki waktu ikat awal semen lebih cepat dibandingkan waktu ikat awal semen tanpa *silica fume*. Pengujian ikatan awal semen juga dilakukan oleh [18] menyampaikan hasil penelitian dengan variasi persentase *silica fume* 0%, 5%, 10%, 15%, 17,5 %, 20%, 22,5%, 25%, 27,5%, dan 30%. Dari penelitian tersebut mendapatkan hasil bahwa semakin tinggi variasi *silica fume* semakin cepat waktu ikat awal semen. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan *silica fume* dapat mempercepat waktu ikat awal semen pada campuran mortar selaras dengan penelitian yang dilakukan oleh [10].

3.2. Pengujian Slump Flow Test

Uji *slump flow test* dilakukan untuk mengetahui salah satu ciri dan karakteristik dari beton SCC dimana memiliki kemampuan untuk mengisi rongga pada cetakan dengan sendirinya sehingga memadat dengan maksimal. Pengujian ini dilakukan dengan cara mengukur diameter akhir pada saat proses pengujian berlangsung. Pengujian menggunakan alat Kerucut Abram's menurut metode dan standar uji EFNARC, (2002). Hasil uji *slump flow test* dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Pengujian *slump flow*

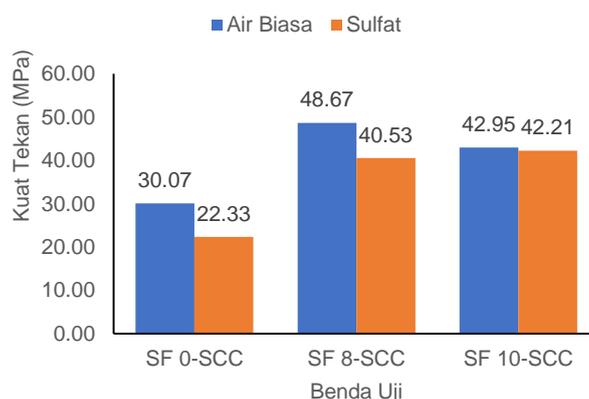
Hasil pengujian disajikan pada **Gambar 1** didapatkan nilai *slump flow test* tertinggi sebesar 575 mm pada benda uji tanpa penambahan *silica fume*. Diketahui bahwa adukan beton dengan *silica fume* 8% dan 10% mempunyai nilai *slump flow* yang lebih kecil sebesar 550 mm dan 525 mm dibandingkan adukan beton tanpa *silica fume*. Campuran beton dengan penambahan *silica fume* 8% dan 10% menyebabkan nilai uji *slump flow* menurun. Pada penelitian ini, menyatakan bahwa adanya penambahan *silica fume* dapat menurunkan nilai *slump flow*. Menurut standar EFNARC nilai *slump flow test* berkisar antara 650-800 mm sehingga hasil *slump flow test* pada penelitian ini tidak memenuhi standar. Hasil ini menunjukkan bahwa pemakaian bahan tambah harus berhati-hati, karena penggunaan bahan tambah bertujuan memperbaiki dan meningkatkan sifat-sifat beton misalnya meningkatkan workabilitas beton dan mengurangi retak [19] tetap harus disesuaikan dengan fungsinya. Faktor yang diduga mengakibatkan nilai *slump flow test* tidak memenuhi adalah lama waktu pengadukan yang melebihi waktu pengadukan pada umumnya. Sesuai penelitian yang dilakukan oleh [20], bertambahnya waktu pencampuran akan mempengaruhi penurunan nilai *slump*. Secara hasil nilai *slump flow test* terendah sebesar 525 mm didapat pada benda uji dengan penambahan *silica fume* sebanyak 10%. *Silica fume* dapat mengurangi kemampuan kerja beton, hal ini terjadi karena partikel *silica fume* sangat

halus sehingga diperlukan lebih banyak air guna membasahi permukaan partikel *silica fume*. Semakin banyak *silica fume* yang ditambahkan ke dalam campuran maka nilai *slump*-nya semakin rendah, karena *silica fume* merupakan zat aditif yang menyebabkan campuran beton lebih cepat mengeras dan menjadikannya lebih padat [21].

Peneliti sebelumnya [22] melaporkan pada pengujian *slump flow* dengan penambahan *silica fume* 0%, 8%, 9%, 10%, dan 11%. Beton dengan variasi *silica fume* kadar 8% memiliki *slump flow* tertinggi meskipun *slump flow* berangsur menurun di kadar 9%, 10%, dan 11%. Menurut [22] menurunnya nilai *slump* disebabkan oleh meningkatnya kekentalan campuran beton. Hasil pengujian juga senada dengan penelitian yang dilakukan oleh [23] yang menyimpulkan bahwa campuran yang diberi penambahan *silica fume* sebesar 10% berat menghasilkan campuran yang kaku atau tidak *flowable* dengan ciri nilai *slump* yang rendah. Hasil yang sama juga didapatkan pada penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh [24] bahwa pengujian *slump flow* pada benda uji dengan penambahan 5%, 10%, dan 15% *silica fume* mengalami penurunan nilai *slump flow*.

3.3. Pengujian Kuat Tekan Beton

Uji kuat tekan beton dilakukan pada umur 28 hari dengan benda uji berbentuk silinder yang berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm yang ditekan menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM). Sebelum pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari, setiap variasi benda uji dilakukan perendaman air biasa dan larutan sulfat (Na_2SO_4) konsentrasi 5%. Benda uji beton yang akan direndam larutan sulfat sebelumnya akan direndam air biasa dahulu (*curing*) selama 10 hari kemudian dilanjutkan direndam larutan sulfat selama 28 hari. Beton dengan perendaman air biasa bertujuan sebagai simulasi apabila beton akan digunakan pada kondisi lingkungan sekitar tidak terpapar zat kimia (normal), sedangkan perendaman larutan sulfat sebagai simulasi apabila beton berada pada kondisi di lingkungan yang memungkinkan terjadinya paparan zat kimia. Metode pengujian kuat tekan berpedoman pada SNI 1974-2011. Hasil pengujian kuat tekan disajikan pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Hasil pengujian kuat tekan beton

Hasil pengujian pada **Gambar 2** didapatkan bahwa terjadi peningkatan nilai kuat tekan pada campuran beton dengan penambahan *silica fume* dengan kadar penggunaan 8% dan 10% dibandingkan campuran beton tanpa *silica fume* baik pada perendaman air biasa maupun perendaman air sulfat. Meskipun terjadi penurunan kuat tekan pada pemakaian *silica fume* 10% dibandingkan pemakaian *silica fume* 8%, namun peningkatannya cukup tinggi yaitu sebesar 43% jika ditinjau dari benda uji dosis 0%. Efektifitas penggunaan *silica fume* dalam meningkatkan nilai kuat tekan pada benda uji beton juga dinyatakan oleh [12] dimana partikel *silica fume* yang sangat halus dapat mengisi pori-pori dan meningkatkan kepadatan pasta sehingga meningkatkan kekuatan tekan. Menurut [22] *silica fume*

mampu meningkatkan kuat tekan beton sampai kadar optimumnya, namun pada kadar tertentu kuat tekan beton dengan *silica fume* akan menurun dikarenakan sifat *silica fume* yang menyerap air sehingga menyebabkan kandungan air di dalam beton berkurang. Dalam penelitian lain yang dilakukan oleh [17] *silica fume* ditambahkan ke dalam campuran karena dapat mengisi rongga mikro dalam campuran beton dan antarmuka antara agregat kasar dan mortar sehingga kuat tekan beton dapat ditingkatkan.

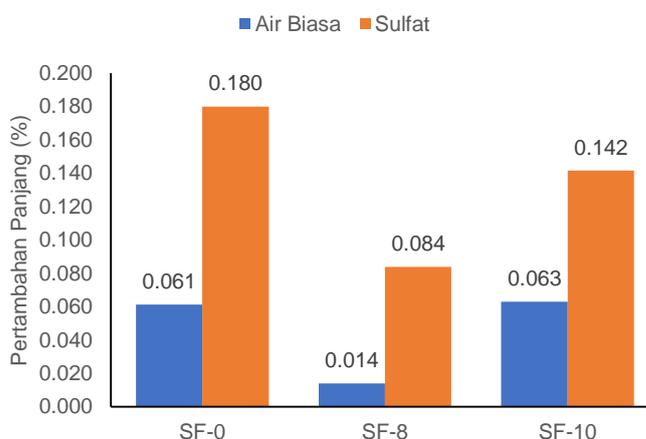
Perendaman air sulfat ditujukan untuk mengetahui pengaruh ketahanan beton *silica fume* ketika berada dalam lingkungan air sulfat dibandingkan ketika direndam dengan air biasa. Hasil analisa menunjukkan beton tanpa *silica fume* memiliki penurunan kuat tekan sebesar 25,73% dimana hasil penurunan ini lebih besar apabila dibandingkan dua penelitian sebelumnya oleh [25] dan [26] yang menghasilkan penurunan sebesar 13,33% dan 9,52%. Hasil penurunan kuat tekan yang lebih tinggi pada penelitian ini sangat mungkin disebabkan oleh perbedaan kualitas beton tanpa penambahan *silica fume* dibandingkan kualitas beton penelitian sebelumnya. Sedangkan ketahanan sulfat tertinggi ditunjukkan pada kadar pemakaian sulfat sebesar 10% yang mengalami penurunan kuat tekan sebesar 1,7% dibandingkan kadar *silica fume* 8% yang mengalami penurunan kuat tekan sebesar 16,7%, dimana besarnya penurunan ini sesuai dengan penelitian [25] dan [26]. Hasil ini juga didukung penelitian yang dilakukan oleh [27] yang menyatakan hasil studi porosimetri menunjukkan bahwa penggunaan *silica fume* pada benda uji kadar 8% menghasilkan penurunan jumlah pori yang lebih kecil dari 0,15 μm dibandingkan dengan benda uji tanpa *silica fume*. Hasil ini senada dengan penelitian sebelumnya [3] dengan penambahan *silica fume* dapat meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat. Berdasarkan hasil kuat tekan beton, beton memiliki kuat tekan diatas kuat tekan rencana yaitu 25 MPa.

3.4. Perubahan Panjang

Pengujian ekspansi dengan cara mengukur perubahan panjang dari balok mortar menggunakan alat *dial gauge* yang dipasang pada penyangga vertikal. Sebelum dilakukan pengukuran, *dial gauge* dikalibrasi dengan menggunakan alat *Length Change Comparator*. Benda uji yang diukur berupa benda uji balok 285 mm x 25 mm x 25 mm. Pengujian ini dilakukan pada 1 kali siklus basah-kering yang dimana benda uji beton akan berada pada kondisi 7 hari basah (dapat direndam air biasa maupun larutan sulfat) dan 7 hari kering. Pengujian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Muhammadiyah Surakarta. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Gambar 3**.



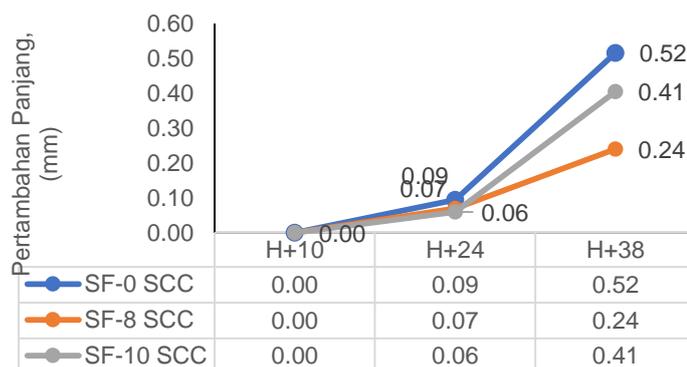
(a) Alat uji perubahan panjang (*length change*)



(b) Prosentase Perubahan panjang mortar antara Rendaman Air Biasa dengan Larutan Sulfat

Gambar 3. Perubahan panjang beton

Pada pengukuran pertama yaitu 10 hari, merupakan data awal pengujian. Selanjutnya benda uji melewati siklus *wet-dry* yang pertama, selama 7 hari rendam dan 7 hari kering. Setelah mendapatkan 1 siklus *wet-dry*, benda uji kembali diukur pada usia 14 hari siklus dan dilanjutkan pada siklus ke-2. Didapatkan hasil pada rentang nilai 0,06 mm hingga 0,09 mm pada siklus pertama. Perbedaan benda uji yang direndam sulfat terlihat jelas pada siklus ke-2 dimana pada benda uji dengan variasi *silica fume* 8% memiliki nilai ekspansi terkecil. Benda uji tanpa *silica fume* mengalami kenaikan ekspansi tertinggi sejak siklus 1 kemudian diperlihatkan pada siklus 2 mencapai nilai ekspansi tertinggi sebesar 0,52%.



Gambar 4. Pengukuran siklus *wet-dry*

Berdasarkan hasil pengujian *length change* didapatkan bahwa benda uji mortar tanpa *silica fume* yang melalui perendaman larutan sulfat mengalami perubahan panjang yang cukup besar apabila dibandingkan perendaman dengan air biasa sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3 (b). Penambahan *silica fume* 8% pada mortar memiliki perubahan panjang terkecil jika dibandingkan dengan mortar variasi *silica fume* 0% dan 10%. Pertambahan panjang benda uji mortar terjadi ketika benda uji mortar terkena larutan korosif yang disebabkan oleh terjadinya reaksi ekspansif antara ion agresif larutan sulfat dan waktu semen terhidrasi yang dapat meningkatkan volume *gypsum* dan *ettringite* dalam mortar [28]. Hal ini senada dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh [29] yang melaporkan bahwa ekspansi dalam larutan Na_2SO_4 berkurang dengan peningkatan kandungan *silica fume*.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh [30] menyatakan bahwa perubahan panjang benda uji mortar terjadi ketika benda uji terkena larutan korosif. Selanjutnya dijelaskan bahwa efek penambahan *silica fume* menurunkan perubahan panjang dibandingkan dengan benda uji kontrol tanpa penambahan *silica fume*. Oleh karena itu, hasil penelitian ini memastikan bahwa penambahan *silica fume* pada benda uji mortar memiliki ketahanan yang lebih baik di dalam lingkungan korosif. Menurut ASTM C-1240 persyaratan maksimum ekspansi ketahanan sulfat dengan resistensi sedang 6 bulan sebesar 0,10 % sehingga hasil penelitian ini tidak sesuai dengan persyaratan ASTM C-1240. Faktor yang mungkin menjadi penyebab hasil penelitian ini yang lebih tinggi dari ASTM C-1240 yaitu suhu ruangan yang kurang terkontrol dalam penelitian. Berdasarkan hasil tersebut, pengaruh penambahan *silica fume* terhadap perubahan panjang pada penelitian ini dapat meningkatkan ketahanan mortar terhadap serangan sulfat dengan ditandai kecilnya nilai perubahan panjang yang terjadi.

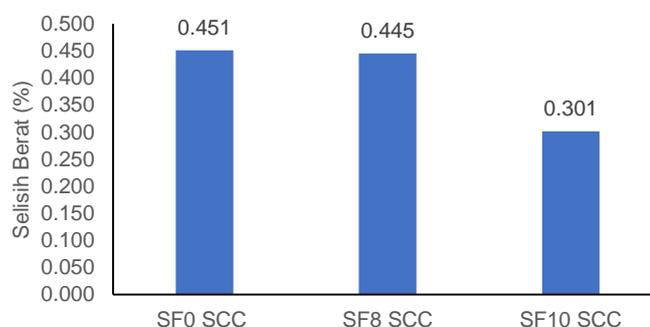
3.5. Kehilangan Berat

Pengujian kehilangan berat dilakukan dengan alat timbangan skala 5 gr dengan benda uji berbentuk silinder berukuran diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm dalam keadaan SSD. Pengambilan data dilaksanakan saat benda uji beton akan direndam air sulfat dan setelah benda uji direndam air sulfat. Hasil pengujian ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Dari **Tabel 5** dan **Gambar 5** menunjukkan benda uji yang direndam dengan larutan sulfat mengalami penurunan berat dimana benda uji tanpa *silica fume* mengalami penurunan yang lebih besar apabila dibandingkan dengan benda uji beton yang menggunakan *silica fume*. Menurut Hassan dkk. [31] siklus pengeringan kehilangan berat untuk semua campuran dikaitkan dengan pembentukan gipsum pada permukaan beton yang menyebabkan lebih banyak penyusutan dan akibatnya mengalami penurunan berat. Menurut [3] dalam penelitiannya banyak kerusakan visual dan pelepasan bubuk dan pecahan beton diamati pada permukaan beton. Pengaruh penambahan *silica fume* meningkatkan ketahanan benda uji beton karena *silica fume* secara efektif mengurangi pembentukan produk deteriorasi, yaitu ettringite dan gipsum. Disisi lain, *silica fume* dapat memperkecil struktur pori secara signifikan. Efek penyempurnaan struktur pori akibat *silica fume* memainkan peran penting dalam peningkatan ketahanan benda uji beton yang terkena serangan sulfat [32]. Berdasarkan hasil tersebut penambahan *silica fume* dapat meningkatkan ketahanan beton dengan menjaga berat isi sehingga mengurangi dampak kerusakan pada beton dimana hasil ini selaras dengan penelitian [32].

Tabel 5. Pengujian Kehilangan Berat

No	Benda uji	Berat Awal (gram)	Berat Akhir (gram)	Prosentase perubahan	Rata-Rata prosentase
1	0 SCC - 1	12.125	12.070	-0,454	
2	0 SCC - 2	12.005	11.950	-0,458	-0,451
3	0 SCC - 3	12.480	12.425	-0,441	
4	SF8 SCC - 1	12.600	12.545	-0,437	
5	SF8 SCC - 2	11.840	11.785	-0,465	-0,445
6	SF8 SCC - 3	12.690	12.635	-0,433	
7	SF10 SCC - 1	12.130	12.095	-0,289	
8	SF10 SCC - 2	12.045	12.005	-0,332	-0,301
9	SF10 SCC - 3	12.365	12.330	-0,283	



Gambar 5. Persentase selisih berat isi

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan mengenai pengaruh pemakaian *silica fume* pada beton, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penambahan *silica fume* mempercepat waktu ikatan awal semen, menurunkan nilai slump flow sehingga memerlukan air yang lebih banyak untuk mempertahankan *workability* rencana.
2. Pemakaian *silica fume* berkontribusi meningkatkan ketahanan beton SCC terhadap serangan sulfat ditinjau dari pengurangan kehilangan berat isi dan perubahan panjang dibandingkan dengan beton tanpa penambahan *silica fume*.
3. Kadar optimum *silica fume* untuk meningkatkan kuat tekan beton dan meningkatkan ketahanan sulfat dengan metode *length change*, adalah sebesar 8%.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Riset dan Inovasi Universitas Muhammadiyah Surakarta atas dukungan pendanaan penelitian melalui skema penelitian RIKOM dengan nomor kontrak: 303.14/A.3-III/LRI/X/2023. Selain itu ucapan terima kasih ditujukan kepada kepada PT. Pancadharm Beton Karanganyar, PT. Seloprogo Sakti Klaten dan PT. Solusi Bangun Beton Yogyakarta yang telah membantu untuk penyediaan bahan material penelitian serta Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah memfasilitasi peralatan penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] H. Sasanipour, F. Aslani, and J. Taherinezhad, "Effect of silica fume on durability of self-compacting concrete made with waste recycled concrete aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 227, p. 116598, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.324.
- [2] D. Susanto, Z. Djauhari, and M. Olivia, "Karakteristik Beton Portland Composite Cement (PCC) Dan Silica Fume Untuk Aplikasi Struktur di Daerah Laut," *J. Rekayasa Sipil*, vol. 15, no. 1, p. 1, 2019, doi: 10.25077/jrs.15.1.1-11.2019.
- [3] G. Zhao, J. Li, and W. Shao, "Effect of mixed chlorides on the degradation and sulfate diffusion of cast-in-situ concrete due to sulfate attack," *Constr. Build. Mater.*, vol. 181, pp. 49–58, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.251.
- [4] N. Shanahan and A. Zayed, "Cement composition and sulfate attack. Part I," *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, no. 4, pp. 618–623, 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.12.004.
- [5] A. C1012-04, *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. 2004.
- [6] S. Oymael, "The effect of sulphate on length change of concrete," *Oil Shale*, vol. 24, no. 4, pp. 561–571, 2007, doi: 10.3176/oil.2007.4.07.
- [7] J. Haufe and A. Vollpracht, "Tensile strength of concrete exposed to sulfate attack," *Cem. Concr. Res.*, vol. 116, no. June 2018, pp. 81–88, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.11.005.
- [8] A. M. Saba *et al.*, "Strength and flexural behavior of steel fiber and silica fume incorporated self-compacting concrete," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 12, pp. 1380–1390, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.03.066.
- [9] R. P. B. Anggraini and M. Solikin, "PENGARUH PEMAKAIAN SILICA FUME TERHADAP KARAKTERISTIK BETON DENGAN VARIASI KANDUNGAN FLY ASH," *Pros. Semin. Nas. Tek. Sipil 2023*, pp. 1–8, 2023.
- [10] R. Siddique and N. Chahal, "Use of silicon and ferrosilicon industry by-products (silica fume) in cement paste and mortar," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 55, no. 8, pp. 739–744, 2011, doi: 10.1016/j.resconrec.2011.03.004.
- [11] X. Xu and X. Lin, "Konstruksi dan Bahan Bangunan Pengaruh asap silika terhadap waktu pengerasan dan sifat mekanik semen magnesium fosfat baru," vol. 235, 2020.
- [12] D. Wang, X. Zhou, Y. Meng, and Z. Chen, "Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack," *Constr. Build. Mater.*, vol. 147, pp. 398–406, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.172.
- [13] F. Liu, T. Zhang, T. Luo, M. Zhou, K. Zhang, and W. Ma, "Study on the Deterioration of Concrete under Dry–Wet Cycle and Sulfate Attack," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 18, 2020, doi: 10.3390/ma13184095.
- [14] X. Jiansen, Peiming, Haoxin, "Sulfate Attack Resistance of Air-entrained Silica Fume Concrete under Dry-Wet Cycle Condition," *J. Wuhan Univ. Technol. Sci. Ed*, pp. 857–864, 2016, doi: 10.1007/s11595-016-1459-8.
- [15] I. Damayanti and A. Rochman, "Tinjauan Penambahan Microsilica dan Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi," *J. Eco Rekayasa*, vol. 2, no. 1, pp. 24–30, 2006.

- [16] M. Ujianto, E. L. Ardiansyah, G. O. Ilokana, and M. F. Falah, "Optimization of superplasticizer MasterGlenium SKY 8614 with added materials fly ash, steel slag, and silica fume for high strength concrete," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 403, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/403/1/012026.
- [17] M. Solikin and A. Ariska, "Pengaruh Penggunaan Silica fume Terhadap Sifat Mekanis Beton Mutu Tinggi High Volume Fly Ash (HVFA)," *JRST (Jurnal Ris. Sains dan Teknol.*, vol. 7, no. 2, p. 157, 2023, doi: 10.30595/jrst.v7i2.16582.
- [18] G. A. Rao, "Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars," *Cem. Concr. Res.* 33, vol. 33, pp. 1765–1770, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00171-6.
- [19] S. Trinugroho and R. N., "Capacity Press and Pull Concrete With Material Added Filler Ash Bagasse and Ash Charcoal Briket With Fas 0,45," *Din. Tek. SIPIL*, pp. 258–261, 2009.
- [20] H. Mallisa, "Pengaruh Lamanya Pengadukan Terhadap Nilai Slump Dan Kandungan Udara Campuran Beton," *SMARTek*, pp. 81–87, 2008.
- [21] Y. M. S. N.R, S. Nisumanti, and D. Chandra, "Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Beton Fc ' 25," *Publ. Ris. Orientasi Tek. Sipil*, no. 1, pp. 1–6, 2023.
- [22] W. S. Wicaksono, Wibowo, and E. Safitri, "Pengaruh Kadar Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Pada High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete (Hvfa-Scc) Benda Uji Silinder D 7,5 Cm X 15 Cm Usia 14, 28 Dan 90 Hari," *e-Jurnal Matriks Tek. Sipil*, vol. 7, no. 3, pp. 638–645, 2019, doi: 10.20961/mateksi.v7i3.36492.
- [23] A. Basuki and M. I. Sadikin, "PENGARUH JENIS SEMEN DAN PENAMBAHAN SILICA FUME TERHADAP KEKUATAN DAN DURABILITAS BETON," *J. Teknol. Bahan dan Barang Tek.*, vol. c, pp. 25–34, 2012.
- [24] S. H. V. Mahalakshmi and V. C. Khed, "Experimental study on M-sand in self-compacting concrete with and without silica fume," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 1–5, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.01.432.
- [25] A. F. Bingol and H. H. Balaneji, "Determination of Sulfate Resistance of Concretes Containing Silica Fume and Fly Ash," *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, vol. 3456789, no. Jahren 1983, 2018, doi: 10.1007/s40996-018-0160-x.
- [26] F. E. G. P and G. Tanzil, "VARIASI BUBUK KACA SUBSTITUSI SEBAGIAN PASIR DENGAN VARIASI BUBUK KACA SUBSTITUSI SEBAGIAN PASIR DENGAN w/c 0,60 DAN 0,65," *J. Tek. Sipil dan Lingkungan.*, vol. 1, no. 1, pp. 68–73, 2013.
- [27] J. Strzałkowski and H. Garbalińska, "The Influence of Silica Fume on the Mechanical and Thermal Parameters of Portland Cement Concretes," *J. Ecol. Eng.*, vol. 20, no. 9, pp. 95–102, 2019, doi: <https://doi.org/10.12911/22998993/112503>.
- [28] S. Lee, "Performance of Mortars Exposed to Different Sulfate Concentrations," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 16, pp. 601–609, 2012, doi: 10.1007/s12205-012-1054-2.
- [29] J. Zelic, R. Krstulovic, E. Tkalcec, and P. Krolo, "Durability of the hydrated limestone-silica fume Portland cement mortars under sulphate attack," *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, pp. 819–826, 1999.
- [30] B. W. Jo, S. Chakraborty, S. T. Lee, and Y. S. Lee, "Durability Study of Silica Fume-mortar exposed to the Combined Sulfate and Chloride-rich Solution," *KSCE J. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 1, pp. 356–366, 2019, doi: 10.1007/s12205-018-5809-2.
- [31] A. Hassan, H. Bin Mahmud, M. Zamin, B. Alsubari, and A. Abdulla, "Artikel Penelitian Pengaruh Magnesium Sulfat pada Self-Compacting Concrete Mengandung Bahan Semen Pelengkap," vol. 2013, 2013.
- [32] X. Lv, Y. Dong, R. Wang, C. Lu, and X. Wang, "Resistance improvement of cement mortar containing silica fume to external sulfate attacks at normal temperature," *Constr. Build. Mater.*, vol. 258, p. 119630, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119630.

