



Tersedia Secara Online di
<http://ojs.unik-kediri.ac.id/index.php/jurmateks/index>
<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6560>

JURMATEKS

Studi Eksperimental *High Volume Fly ash Self-Compacting Concrete* (HVFA SCC) dengan Penambahan 5% Silica Fume terhadap Sifat Reologi dan Mekanik

Tiorivaldi^{1*}, A. P. Abriantoro²

^{1*,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta

Email: ^{1*} tiorivaldi@uta45jakarta.ac.id, ² adji.putra@uta45jakarta.ac.id

ARTICLE INFO

Article history :

Artikel masuk : 12 - 12 - 2024
Artikel revisi : 20 - 12 - 2024
Artikel diterima : 31 - 12 - 2024

Keywords :

Compressive Strength, Flowability, Fly ash, HVFA SCC, Permeability, Silica Fume

Style IEEE dalam mensitasi artikel ini:

Tiorivaldi dan A. P. Abriantoro
"Studi Eksperimental High Volume fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC) dengan Penambahan 5% Silica Fume terhadap Sifat Reologi dan Mekanik" *Jurmateks*, vol.7, no.2, pp. 114 -128, 2024, doi: 10.30737/jurmateks.v7i2.6560

ABSTRACT

The development of concrete technology is an important part of supporting sustainable development. This development not only focuses on easy and efficient working methods, but also encourages the use of environmentally friendly materials such as fly ash and silica fume. This research aims to investigate the effect of varying fly ash content with the addition of silica fume on the mechanical and rheological properties of High Volume Fly ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC). Variations in fly ash content (0%, 50%, 55%, 60%, and 65%) with the addition of 5% silica fume. The parameters evaluated include flowability, compressive strength, and permeability. Optimal flowability (750 mm) was achieved at 50–55% fly ash, making it suitable for complex structural applications. Compressive strength peaked at 48.7 MPa with 50% fly ash due to a balance of cement hydration and pozzolanic reactions, while higher fly ash content led to slight reductions. Permeability significantly decreased as fly ash content increased, from 84.1 mm at 0% fly ash to 6.08 mm at 65%, indicating enhanced matrix densification and water resistance due to fly ash's filler effect and pozzolanic activity. The study concludes that 50% fly ash offers the optimal balance, achieving a flowability of 720 mm, compressive strength of 48.7 MPa, and permeability of 58.7 mm. This research shows the potential of fly ash and silica fume as complementary materials to improve the performance of SCC, while recommending a balanced mix design between workability, strength and durability, supporting the development of environmentally friendly and sustainable concrete.

1. Pendahuluan

Saat ini, permintaan beton global terus meningkat seiring dengan perkembangan infrastruktur. Permintaan beton dunia diprediksi akan mencapai 18 miliar ton per tahun pada

Studi Eksperimental *High Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete* (HVFA SCC) dengan Penambahan 5% Silica Fume terhadap Sifat Reologi dan Mekanik

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6560>



tahun 2050. Beton modern dituntut untuk memiliki kombinasi antara kinerja mekanik yang unggul, ketahanan yang baik terhadap lingkungan, dan efektivitas dalam pengerjaan [1], [2]. Permasalahan timbul ketika proses produksi dan aplikasi beton tidak sesuai dengan standar yang telah ditentukan. Salah satu permasalahan yang terjadi adalah menurunnya mutu beton akibat pemadatan yang kurang sempurna, yang menyebabkan tingkat kepadatan beton tidak optimal. Pemadatan yang buruk tidak hanya menurunkan kekuatan tekan tetapi juga mengurangi durabilitas beton, menyebabkan masalah seperti *honeycombing* dan ekspos tulangan.

Penelitian terbaru menyoroti bahwa proses pemadatan yang tidak memadai dapat menyebabkan udara terperangkap dalam beton, mengurangi kekuatan tekan hingga 5% untuk setiap peningkatan 1% udara yang terjebak [3], [4]. Proses pemadatan sangat penting untuk memastikan kekuatan dan ketahanan beton dalam jangka panjang [5]–[8]. Penelitian mengemukakan bahwa teknologi *self-compacting concrete* (SCC) menjadi solusi yang efektif dan dapat diterapkan, terutama pada struktur dengan tulangan yang kompleks.

SCC memungkinkan campuran beton untuk mengisi setiap ruang di dalam bekisting secara otomatis tanpa memerlukan pemadatan manual menggunakan alat vibrator [9]–[11]. SCC memberikan keuntungan signifikan dalam efisiensi pekerjaan, kualitas permukaan, serta mengurangi kebisingan pada proyek konstruksi [12]–[14]. Struktur beton SCC dapat lebih solid, terutama di daerah penulangan yang sangat rapat, dan waktu pelaksanaan pengecoran juga relatif menjadi lebih cepat karena beton tersebut dicor tanpa perlu melakukan pemadatan manual sehingga dapat mengurangi kebutuhan biaya tenaga kerja di lapangan [15], [16].

Kebutuhan beton mutu tinggi yang memenuhi kriteria SCC tetap harus memperhatikan dampak lingkungan. Hal tersebut menjadi sebuah pemikiran untuk memanfaatkan potensi besar limbah industri sebagai salah satu substituen dalam desain campuran beton SCC [17], [18]. Karena tanpa kita sadari, penggunaan semen telah membawa dampak negatif yang besar terhadap pemanasan global. Di Indonesia, produksi semen sebagai komponen utama beton juga menunjukkan peningkatan. Menurut data United States Geological Survey (USGS), produksi semen di Indonesia mencapai 64 juta ton pada tahun 2022. [19]. Fakta menyebutkan bahwa produksi satu ton semen menghasilkan sekitar 0,9 ton emisi CO₂. Menurut International Energy Authority (IEA), produksi semen portland menyumbang 7% dari keseluruhan emisi karbon dioksida oleh manusia [20]. Oleh karena itu, dibutuhkan tindakan dan inovasi yang lebih berkelanjutan seperti penggunaan material ramah lingkungan dalam industri semen untuk mengurangi dampaknya terhadap perubahan iklim global.

Untuk mengurangi emisi CO₂ yang dilepaskan selama produksi semen, telah dilakukan berbagai penelitian yang bertujuan untuk mengurangi Tingkat produksi semen ini. Salah satu pendekatan yang dilakukan adalah menggunakan semen komposit dengan mencampurkan semen dengan *fly ash*, limbah hasil pembakaran batu bara. Selain itu, terdapat pula opsi pemanfaatan limbah dari produksi sampingan proses industri *silicon* atau *ferrosilicon* dalam dunia industri metalurgi, yakni *silica fume*. *Silica fume* terdiri dari partikel-partikel halus dan partikel *silica fume* sangat kecil yakni sekitar 100 kali lebih kecil dari partikel semen, dan memiliki luas permukaan yang sangat besar. Sehingga penggunaan *fly ash* dan *silica fume* dapat membuatnya sangat efektif dalam meningkatkan kekuatan, kepadatan beton serta ketahanan terhadap serangan kimiawi pada beton SCC [21]–[26]. Dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut, penggunaan high volume *fly ash* dan *silica fume* pada beton SCC menjadi pilihan material yang ramah lingkungan yang efektif dan efisien untuk meningkatkan kinerja beton.

Penggunaan *fly ash* dan *silica fume* dalam *Self-Compacting Concrete* (SCC) terus menjadi fokus penelitian global untuk meningkatkan kinerja beton sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* dan *silica fume* dapat meningkatkan sifat mekanik dan durabilitas SCC melalui pengurangan porositas dan peningkatan densitas mikrostruktur [23]. *Fly ash* dikenal sebagai material pozzolan yang efektif dalam mengurangi konsumsi semen [22], sementara *silica fume* dengan ukuran partikelnya yang sangat halus berkontribusi pada kekuatan awal dan durabilitas beton [24]. Namun, sebagian besar penelitian hingga saat ini membatasi kadar *fly ash* hingga 50%, dengan sedikit perhatian pada pengaruh kadar tinggi (*High Volume Fly ash*) terhadap keseimbangan sifat mekanik, reologi, dan durabilitas beton [24]. Selain itu, efek sinergis antara *fly ash* dan *silica fume* pada kadar tinggi belum dieksplorasi secara komprehensif, khususnya dalam pengaruhnya terhadap sifat reologi seperti viskositas dan stabilitas segar beton [12], [25]. Meskipun banyak penelitian telah mengevaluasi penggunaan *fly ash* dan *silica fume* dalam beton SCC, sebagian besar studi hanya terbatas pada penggunaan kadar *fly ash* rendah hingga sedang ($\leq 50\%$) [22][23][24][25] dan lebih menekankan pada sifat mekanik, seperti kuat tekan, dibandingkan dengan keseimbangan antara sifat mekanik, reologi, dan durabilitas [24], [25]. Namun, kajian komprehensif pada kadar *fly ash* tinggi (*High Volume Fly ash*) dalam desain campuran SCC dengan pendekatan sistematis masih terbatas.

Penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi pengaruh variasi kadar *fly ash* dengan penambahan *silica fume* terhadap sifat mekanik dan reologi High Volume Fly ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC). Sehingga akan diperoleh material beton dengan

karakteristik yang unggul baik dari segi kekuatan mekanik, daya tahan, maupun reologi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi panduan dalam mengembangkan dan mengoptimalkan campuran HVFA SCC yang tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memiliki kinerja tinggi untuk aplikasi dalam berbagai jenis konstruksi.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pembuatan sampel beton di laboratorium untuk mengkaji pengaruh variasi kadar fly ash dan penambahan silica fume terhadap karakteristik High Volume Fly ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC). Proses penelitian mencakup pengujian terhadap beberapa parameter utama, seperti flowability untuk mengukur kemampuan campuran beton dalam mengalir tanpa bantuan alat pemadat eksternal, serta pengujian mutu kuat tekan beton (f_c) untuk menentukan kapasitas daya tahan material terhadap beban tekan. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis perubahan angka porositas dan permeabilitas beton sebagai indikator durabilitas. Penurunan angka porositas dan permeabilitas menunjukkan potensi beton dalam menahan penetrasi air dan zat kimia berbahaya, yang berkontribusi pada peningkatan ketahanan beton terhadap degradasi lingkungan. Data hasil pengujian ini diharapkan dapat memberikan informasi komprehensif mengenai efektivitas campuran fly ash dan silica fume, serta kontribusinya terhadap sifat mekanik dan reologi HVFA SCC.

2.1 Bahan

Penelitian ini menggunakan bahan-bahan sebagai berikut:

1. Semen Portland (OPC): Digunakan sebagai bahan pengikat utama.
2. Fly ash: Jenis fly ash yang digunakan merupakan kelas F dengan kadar loss on ignition (LOI) di bawah 10%. Variasi kadar fly ash meliputi 0%, 50%, 55%, 60%, dan 65%.
3. Silica Fume: Digunakan sebagai bahan tambahan pozzolan dengan kadar tetap sebesar 5% dari total binder.
4. Agregat Halus dan Kasar: Agregat halus berupa pasir dengan modulus kehalusan 2,5–3,1, dan agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran maksimum 20 mm.
5. Air: Air bersih yang memenuhi standar SNI 03-6827-2002 digunakan dalam seluruh proses pencampuran.
6. Superplasticizer: Jenis polikarboksilat berbasis cair digunakan untuk meningkatkan workability campuran beton.

2.2 Job Mix

Dalam pembuatan beton SCC, digunakan metode mix design yang merupakan modifikasi dari metode mix design ACI. Hal ini dikarenakan metode mix design konvensional tidak lagi sepenuhnya cocok untuk mencapai hasil mix design yang optimal pada beton SCC. Untuk nilai-nilai tertentu EFNARC telah menentukan standar sebagai berikut:

Tabel 1. Standar Mix Design Beton SCC

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

Sumber: Data Penelitian (2024).

Jenis semen ditentukan yaitu semen Portland tipe 1 Dalam komposisi campuran beton, perbandingan volume agregat halus dan agregat kasar ditetapkan sebesar 51%: 49%, untuk mencapai distribusi material yang optimal dalam campuran.

2.3 Pengujian

Pengujian utama yang dilakukan dalam penelitian ini, yaitu:

1. Uji kuat tekan dilakukan pengujian pada sampel silinder dengan merujuk pada SNI 1974:2011.
2. Uji kecenderungan aliran (*flowability*) dilakukan dengan mengukur diameter maksimum slump flow yang harus memenuhi standar EFNARC.
3. Uji permeabilitas dilakukan berdasarkan standar DIN EN 12390-8:2009-07

2.4 Analisis Data

Dalam penelitian ini, terdapat empat sampel untuk setiap variasi. Sehingga total keseluruhan sampel sebanyak 20 sampel untuk pengujian flowability, 20 sampel silinder untuk pengujian kuat tekan dan 20 sampel silinder untuk pengujian permeabilitas.

Tabel 2. Sampel Benda Uji

No.	Persentase Material		Pengujian		
	Fly ash	Silica Fume	Flowability	Kuat Tekan	Permeabilitas
1	0%	5%	4 sampel	4 sampel	4 sampel
2	50%	5%	4 sampel	4 sampel	4 sampel
3	55%	5%	4 sampel	4 sampel	4 sampel
4	60%	5%	4 sampel	4 sampel	4 sampel
5	65%	5%	4 sampel	4 sampel	4 sampel
Jumlah			20 sampel	20 sampel	20 sampel

Sumber: Data Penelitian (2024).

Studi Eksperimental High Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC) dengan Penambahan 5% Silica Fume terhadap Sifat Reologi dan Mekanik

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6560>



Dalam penelitian ini, terdapat beberapa variabel yang digunakan untuk menganalisis sifat dan karakteristik beton dengan variasi material. Variabel pertama adalah *fly ash*, yaitu material pengganti sebagian semen dalam campuran beton yang memiliki persentase bervariasi, yakni 0%, 50%, 55%, 60%, dan 65%. Variabel kedua adalah *silica fume*, yang juga merupakan bahan pengganti sebagian semen dengan persentase tetap sebesar 5% untuk semua variasi. Selain itu, dilakukan pengujian terhadap tiga parameter utama, yaitu flowability, kuat tekan, dan permeabilitas.

3. Hasil dan Diskusi

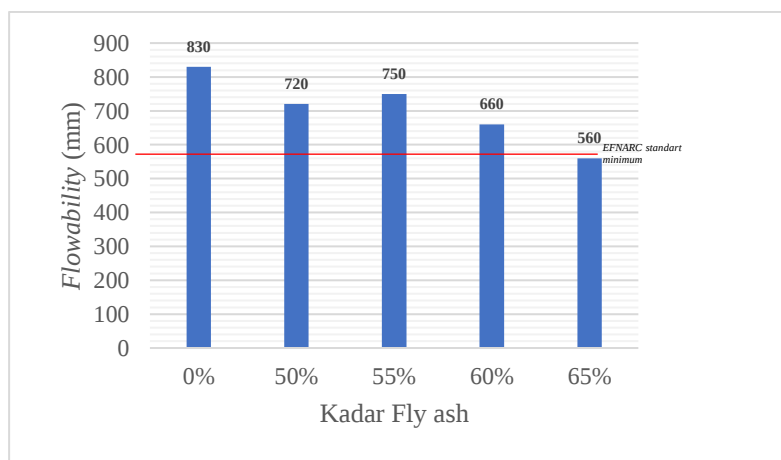
3.1 Flowability HVFA SCC

Flowability merupakan parameter krusial dalam campuran *Self-Compacting Concrete* (SCC), yang menentukan kemampuan beton untuk mengalir dan mengisi cetakan dengan sempurna tanpa segregasi atau bantuan pemadatan mekanis.



Sumber: Dokumentasi Penulis (2024).

Gambar 1. Pengujian Flowability Beton Segar HVFA SCC



Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 2. Pengaruh Kadar HVFA-SCC terhadap Flowability

Berdasarkan informasi dari **Gambar 2**, semua campuran dengan variasi kadar *fly ash* (0%, 50%, 55%, 60%, dan 65%) berada pada rentang 560-830 mm. Nilai ini memenuhi standar *European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC) untuk SCC dengan rentang flowability yang diperbolehkan adalah antara 550 mm hingga 850 mm. Pada kadar *fly ash* 0%, flowability tercatat paling tinggi sebesar 830 mm, mendekati batas maksimum standar EFNARC. Hal ini disebabkan oleh dominasi semen portland dalam campuran yang menciptakan pasta dengan viskositas rendah sehingga mendukung kemampuan alir yang sangat baik. Campuran beton dengan *fly ash* rendah cenderung memiliki viskositas plastis yang lebih rendah dibandingkan campuran dengan kadar *fly ash* tinggi, karena *fly ash* memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar, yang menyerap lebih banyak air dalam campuran [24]. Namun, pada kadar *fly ash* 65%, flowability menurun menjadi 560 mm, mendekati batas bawah tetapi masih memenuhi standar EFNARC. Penurunan ini mencerminkan peran *fly ash* sebagai material filler yang meningkatkan viskositas pasta beton, sehingga mengurangi kemampuan alirnya. Dalam konteks SCC, viskositas pasta beton yang lebih tinggi pada kadar *fly ash* tinggi memengaruhi kemampuan beton untuk mempertahankan stabilitas segar, tetapi masih dalam batas toleransi untuk memenuhi kriteria beton yang mampu mengisi cetakan secara mandiri.

Fenomena ini dapat dijelaskan oleh dua mekanisme utama. Pertama, *fly ash* memiliki luas permukaan spesifik yang lebih tinggi dibandingkan semen yang menyebabkan penyerapan air lebih besar dalam campuran dan juga superplasticizer yang digunakan hanya bereaksi dengan semen saja tidak dengan *fly ash*. Akibatnya, jumlah air bebas yang tersedia untuk mendukung aliran berkurang. Kedua, *fly ash* meningkatkan interaksi antar-partikel dalam campuran melalui efek fisik dan kimiawi. Secara fisik, partikel *fly ash* berbentuk bulat halus (*spherical particles*), yang memungkinkan distribusi partikel yang lebih rapat dan kontak antar-partikel yang lebih intens. Hal ini menciptakan resistensi aliran yang lebih besar karena meningkatnya gaya gesek antar-partikel dalam pasta beton. Secara kimiawi, reaksi pozzolanik yang lambat pada *fly ash* menghasilkan produk hidrasi tambahan seperti kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang mempererat ikatan antar-partikel, sehingga meningkatkan kekentalan campuran beton segar. Dengan demikian, *fly ash* yang ditambahkan dalam kadar tinggi berkontribusi signifikan pada peningkatan viskositas pasta beton, yang pada akhirnya memengaruhi flowability beton [23]. Dengan demikian, *fly ash* yang ditambahkan dalam kadar tinggi berkontribusi pada peningkatan kekentalan pasta beton. Meskipun flowability menurun seiring dengan meningkatnya kadar *fly ash*, penting untuk ditekankan bahwa penurunan ini masih dalam batas toleransi yang ditetapkan oleh EFNARC. Penggunaan *silica fume* juga

berkontribusi pada peningkatan kualitas keseluruhan, terutama untuk stabilitas dan kekuatan beton segar, yang konsisten dengan literatur sebelumnya [23][24].

Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa untuk aplikasi tertentu yang memerlukan *flowability* tinggi, seperti pengecoran pada struktur dengan geometri kompleks, kadar *fly ash* optimal berada pada kisaran 50% hingga 55%. Pada kisaran ini, *flowability* tetap tinggi (750 mm) dan memberikan kemudahan pengerjaan yang memadai. Penelitian ini menegaskan bahwa meskipun *fly ash* meningkatkan viskositas beton, dengan desain campuran yang tepat dan penggunaan bahan tambahan, HVFA SCC tetap dapat memenuhi standar EFNARC dalam berbagai kondisi aplikasi.

Hasil *flowability* ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa *fly ash* meningkatkan interaksi antar partikel, sehingga menurunkan *flowability*. Meskipun penelitian sebelum ya tidak menjelaskan secara rinci nilai *flowability* yang diperoleh tetapi menyatakan tetap berada dalam standar SCC [23]. Meski demikian, penurunan *flowability* pada kadar *fly ash* tinggi (65%) tidak sejalan dengan temuan [24], pada kadar *fly ash* 0% nilai *flowability* yang diperoleh adalah 550 mm, tetapi pada kadar *fly ash* 65% nilainya naik menjadi 650 mm Perbedaan ini bisa disebabkan oleh beberapa hal, yaitu karakteristik *fly ash* , kandungan superplasticizer, serta metode pengujian yang berbeda.

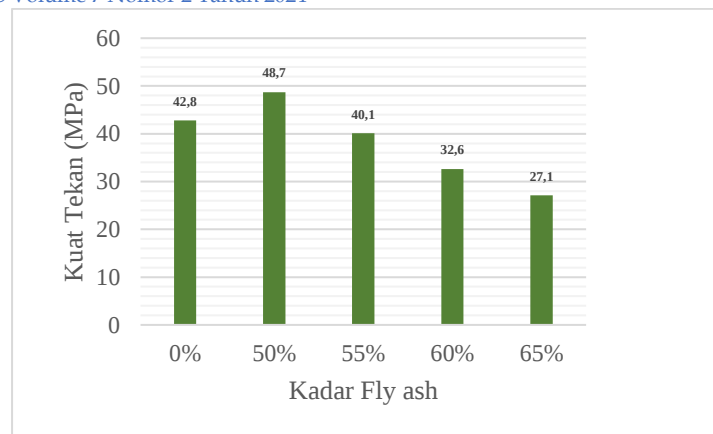
3.2 Kuat Tekan HVFA SCC

Dalam penelitian ini, pengaruh kadar *fly ash* terhadap kuat tekan HVFA SCC menunjukkan pola yang bervariasi dengan peningkatan kuat tekan pada kadar *fly ash* tertentu.



Sumber: Dokumentasi Penulis (2024).

Gambar 3. Pengujian Kuat Tekan Umur 28 Hari HVFA SCC



Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 4. Grafik Pengaruh Kadar HVFA-SCC terhadap Kuat Tekan Umur 28 Hari

Berdasarkan grafik **Gambar 4** kekuatan tekan menunjukkan bahwa peningkatan kadar *fly ash* memiliki pengaruh signifikan terhadap kuat tekan SCC pada umur 28 hari. Pada kadar *fly ash* 0%, beton menunjukkan kuat tekan tertinggi sebesar 42.83 MPa. Angka ini mencerminkan kontribusi penuh semen portland sebagai bahan pengikat utama, yang melalui reaksi hidrasi menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) dalam jumlah besar. C-S-H inilah yang memberikan struktur beton kekuatan mekanisnya. Secara umum, ditemukan bahwa pada kadar *fly ash* 50%, kuat tekan meningkat menjadi rata-rata kuat tekan 48.7 MPa, lebih tinggi dibandingkan kadar *fly ash* 0% yang hanya mencapai rata-rata kuat tekan 42.8 MPa.

Namun, ketika kadar *fly ash* meningkat, kuat tekan beton menunjukkan tren penurunan. Pada kadar *fly ash* 55%, rata-rata kuat tekan turun menjadi 40.1 MPa, dan terus menurun hingga 27.1 MPa pada kadar *fly ash* 65%. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh sifat pozzolanik *fly ash*. Penurunan kuat tekan beton pada kadar *fly ash* yang tinggi disebabkan oleh keterbatasan reaksi pozzolanik, di mana *fly ash* membutuhkan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hasil hidrasi semen untuk membentuk senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang berkontribusi pada kekuatan mekanis beton. Pada kadar *fly ash* tinggi, penggantian semen portland dalam jumlah besar mengurangi ketersediaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, sehingga reaksi pozzolanik tidak berjalan optimal. Selain itu, *fly ash* memiliki reaktivitas yang lebih lambat dibandingkan semen, menyebabkan kekuatan awal beton lebih rendah, meskipun sering meningkat pada umur yang lebih panjang karena reaksi pozzolanik yang berkelanjutan. Penelitian sebelumnya menguatkan temuan ini, menunjukkan bahwa kadar *fly ash* tinggi membatasi hidrasi semen dan menurunkan kekuatan mekanis beton pada umur awal, dengan reaksi pozzolanik maksimal biasanya terjadi pada kadar *fly ash* sekitar 50% [22][23].

Selain itu, *fly ash* memiliki tingkat reaktivitas yang lebih lambat dibandingkan semen portland. Pada umur 28 hari, hidrasi semen telah mendekati selesai, tetapi reaksi pozzolanik *fly ash* masih berlangsung secara bertahap. Hal ini menyebabkan beton dengan *kadar fly ash* tinggi cenderung memiliki kekuatan awal yang lebih rendah. Namun, pada umur yang lebih panjang, seperti 56 hari atau bahkan 90 hari pada penelitian sebelumnya, bahwa beton dengan *fly ash* menunjukkan peningkatan kekuatan yang signifikan karena reaksi pozzolanik yang berkelanjutan [22]–[24]. Penurunan kuat tekan juga dapat dihubungkan dengan struktur mikro beton. *Fly ash* dalam jumlah besar dapat menghasilkan matriks beton yang lebih rapat karena pengisian celah-celah mikro oleh partikel halusanya. Namun, jika *kadar fly ash* terlalu tinggi, pengurangan volume semen portland dapat menciptakan kekurangan pasta aktif yang cukup untuk mengikat agregat secara optimal. Akibatnya, pengujian beton pada umur 28 hari menjadi lebih lemah terhadap beban tekan. Oleh karena itu, dalam aplikasi yang memerlukan kekuatan mekanis tinggi, proporsi *fly ash* harus dioptimalkan untuk memastikan kinerja beton sesuai kebutuhan.

Peningkatan kuat tekan pada kadar *fly ash* 50% telah dikonfirmasi, berdasarkan penelitian sebelumnya hasil tinjauan pada kadar *fly ash* 40%, 50% dan 60% menunjukkan bahwa reaksi pozzolanik maksimal terjadi pada rasio *fly ash* 40 – 50% [22]. Penurunan kuat tekan pada kadar *fly ash* 65% konsisten dengan hasil [23], yang menyatakan bahwa kadar *fly ash* tinggi membatasi hidrasi semen, sehingga menurunkan kekuatan mekanis beton

3.3 Permeabilitas HVFA SCC

Dalam penelitian ini, pengujian permeabilitas dilakukan berdasarkan standar DIN EN 12390-8:2009-07 dengan tekanan air sebesar 5.09 kg/cm² selama 72 jam di laboratorium. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan kedalaman penetrasi air ke dalam beton (dalam satuan milimeter) sebagai representasi kemampuan beton menahan penetrasi air di bawah tekanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar *fly ash* memiliki dampak signifikan terhadap permeabilitas SCC.



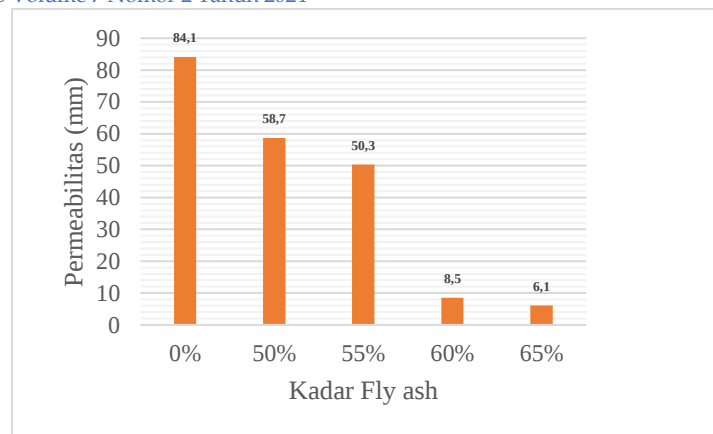
Sumber: Dokumentasi Penulis (2024).

Gambar 5. Pengujian Permeabilitas Umur 28 Hari HVFA SCC

Studi Eksperimental High Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC) dengan Penambahan 5% Silica Fume terhadap Sifat Reologi dan Mekanik

<https://dx.doi.org/10.30737/jurmateks.v7i2.6560>





Sumber: Hasil Penelitian (2024).

Gambar 6. Pengaruh Kadar HVFA-SCC terhadap Permeabilitas Umur 28 Hari

Berdasarkan informasi dari Gambar 6 Pada kadar *fly ash* 0%, beton memiliki nilai permeabilitas tertinggi sebesar 84.1 mm, menunjukkan bahwa beton tanpa *fly ash* cenderung memiliki struktur mikro dengan porositas yang lebih besar. Hal ini dapat dijelaskan oleh hasil hidrasi semen portland yang meskipun menghasilkan senyawa C-S-H yang memberikan kekuatan mekanis tinggi, sering kali meninggalkan pori kapiler dalam jumlah signifikan sebagai sisa dari proses hidrasi. Pori-pori ini menjadi jalur yang memungkinkan air menembus beton, sehingga menghasilkan tingkat permeabilitas yang tinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa beton tanpa bahan tambahan aditif atau bahan pozzolan cenderung lebih rentan terhadap penetrasi cairan, terutama dalam lingkungan dengan tekanan air yang tinggi.

Sebaliknya, pada kadar *fly ash* 50%, permeabilitas beton turun secara signifikan menjadi 58.70 mm, menunjukkan bahwa *fly ash* mulai memberikan kontribusi terhadap pengurangan porositas kapiler dalam matriks beton. Penurunan ini terjadi karena *fly ash* berfungsi sebagai material pengisi (*filler*) yang sangat halus, dimana dapat masuk ke dalam celah mikro dalam beton dan mengurangi ukuran dan jumlah pori-pori yang dapat ditembus air. Pada kadar ini, reaksi pozzolanik *fly ash* juga mulai berkontribusi dengan menghasilkan senyawa C-S-H tambahan yang membantu menutup jalur kapiler.

Penurunan yang lebih drastis terlihat pada kadar *fly ash* 65%, di mana permeabilitas beton hanya sebesar 6.08 mm, hal ini menunjukkan kemampuan *fly ash* untuk menciptakan struktur mikro beton yang sangat rapat dan tahan terhadap penetrasi air. Pada kadar ini, mekanisme pengisian fisik *fly ash* dan kontribusi reaksi pozzolanik bekerja secara optimal, menghasilkan matriks beton yang hampir bebas dari pori kapiler yang kontinu. Reaksi pozzolanik *fly ash* yang menggunakan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2) dari hidrasi semen portland menghasilkan senyawa C-S-H dalam jumlah besar yang secara signifikan meningkatkan densitas beton dan menutup jalur air.

Namun, meskipun permeabilitas beton menurun drastis pada kadar *fly ash* tinggi, penting untuk dicatat bahwa pengurangan ini tidak selalu bersifat linier. Pada kadar *fly ash* yang sangat tinggi, seperti 65%, penurunan volume semen portland dalam campuran dapat menyebabkan pengurangan hidrasi total yang dapat membatasi efisiensi *fly ash* dalam menutup semua pori-pori mikro. Meskipun beton dengan kadar *fly ash* 65% menunjukkan permeabilitas yang sangat rendah, struktur mikro beton dapat menjadi lebih bergantung pada waktu curing yang memadai untuk memastikan reaksi pozzolanik berlangsung sepenuhnya. Jika waktu curing tidak mencukupi, terdapat risiko bahwa matriks beton tidak mencapai kerapatan optimal, yang dapat memengaruhi ketahanan jangka panjang terhadap penetrasi cairan dan serangan kimia seperti karbonasi atau sulfat.

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan *fly ash*, terutama pada kadar 50% hingga 65%, sangat efektif untuk meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air. Beton dengan permeabilitas rendah seperti ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan durabilitas tinggi, seperti struktur bawah tanah, dermaga, dan infrastruktur yang terpapar lingkungan agresif. Permeabilitas yang rendah juga memberikan keunggulan tambahan berupa peningkatan ketahanan beton terhadap degradasi akibat ion-ion agresif, sehingga memperpanjang umur layan struktur. Hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* tidak hanya berfungsi sebagai bahan tambahan untuk mengurangi penggunaan semen portland, tetapi juga sebagai elemen kunci dalam meningkatkan performa beton secara keseluruhan, terutama dalam aspek ketahanan terhadap pengaruh lingkungan.

Penurunan permeabilitas secara teoretis dapat dijelaskan melalui penelitian Mustapha et al. (2021), yang menunjukkan bahwa *fly ash* berperan sebagai material pozzolanik dan pengisi, sehingga mengurangi pori kapiler dalam beton dan meningkatkan keawetan [24]. Hasil ini mendukung penelitian [10], yang menunjukkan bahwa *fly ash* dapat secara signifikan meningkatkan ketahanan beton terhadap penetrasi air pada kadar tinggi .

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar *fly ash* secara signifikan memengaruhi *flowability*, kuat tekan, dan permeabilitas beton pada umur 28 hari. Semua campuran memenuhi standar EFNARC untuk *flowability*, dengan kadar *fly ash* 50% hingga 55% memberikan keseimbangan optimal antara kemampuan alir dan viskositas. Pada kuat tekan, kadar *fly ash* 50% menghasilkan peningkatan hingga 48,7 MPa berkat efek fisik dan reaksi pozzolanik, meskipun pada kadar lebih tinggi kekuatan cenderung menurun karena hidrasi semen yang

berkurang. Permeabilitas beton menurun drastis dengan peningkatan kadar *fly ash*, mencapai nilai terendah 6,08 mm pada kadar 65%, mencerminkan struktur mikro yang rapat dan tahan air. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kadar *fly ash* 50% memberikan hasil optimal dalam meningkatkan durabilitas beton. Dengan mengintegrasikan *fly ash* dan *silica fume*, penelitian ini merekomendasikan desain campuran yang seimbang untuk kemudahan pengerjaan, kekuatan, dan daya tahan, sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari konsumsi semen portland. Hal ini memberikan kontribusi nyata bagi pengembangan teknologi beton ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- [1] B.-T. Huang, Z.-L. Zhang, B. Nematollahi, J. Yu, J.-G. Dai, and L.-Y. Xu, "Editorial: High-performance and sustainable concrete materials and structures," *Front. Mater.*, vol. 11, Oct. 2024, doi: 10.3389/fmats.2024.1506754.
- [2] V. C. Li, *Engineered Cementitious Composites (ECC)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. doi: 10.1007/978-3-662-58438-5.
- [3] H. Ahmed and J. Punkki, "Surface Bubbles Emergence as an Indicator for Optimal Concrete Compaction," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 10, p. 2306, May 2024, doi: 10.3390/ma17102306.
- [4] A. Nowak-Michta, "Impact analysis of air-entraining and superplasticizing admixtures on concrete compressive strength," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 23, pp. 77–82, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2020.01.066.
- [5] T. Ojala, H. Ahmed, P. Kuusela, A. Seppänen, and J. Punkki, "Monitoring of concrete segregation using AC impedance spectroscopy," *Constr. Build. Mater.*, vol. 384, p. 131453, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131453.
- [6] Y. Quan and F. Wang, "Machine learning-based real-time tracking for concrete vibration," *Autom. Constr.*, vol. 140, p. 104343, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104343.
- [7] Z. Tian *et al.*, "Development of real-time visual monitoring system for vibration effects on fresh concrete," *Autom. Constr.*, vol. 98, pp. 61–71, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.autcon.2018.11.025.
- [8] A. Valente Monteiro, A. Gonçalves, J.-P. Balayssac, M.-P. Yssorche-Cubaynes, and A. Costa, "On the role of compaction in disputes over the quality of the supplied concrete," *Mater. Struct.*, vol. 56, no. 3, p. 60, Apr. 2023, doi: 10.1617/s11527-023-02148-2.
- [9] M. Şahmaran, M. Lachemi, T. K. Erdem, and H. E. Yücel, "Use of spent foundry sand

- and fly ash for the development of green self-consolidating concrete,” *Mater. Struct.*, vol. 44, no. 7, pp. 1193–1204, Aug. 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9692-7.
- [10] W. Liang *et al.*, “Experimental study and simulation of workability and compressive performance of SCC with high-volume mineral admixtures,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 409, p. 133997, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133997.
- [11] J. Ahmad, Z. Zhou, and A. F. Deifalla, “Steel Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete: A Comprehensive Review,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 17, no. 1, p. 51, Oct. 2023, doi: 10.1186/s40069-023-00602-7.
- [12] W. S. Alaloul *et al.*, “Mechanical Properties of Silica Fume Modified High-Volume Fly Ash Rubberized Self-Compacting Concrete,” *Sustainability*, vol. 13, no. 10, p. 5571, May 2021, doi: 10.3390/su13105571.
- [13] A. Benli, M. Karataş, and Y. Bakir, “An experimental study of different curing regimes on the mechanical properties and sorptivity of self-compacting mortars with fly ash and silica fume,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 144, pp. 552–562, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.228.
- [14] P. Dinakar, K. G. Babu, and M. Santhanam, “Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 30, no. 10, pp. 880–886, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2008.06.011.
- [15] M. Ouchi, S. Nakamura, T. Osterberg, S.-E. Hallberg, and M. Lwin, “Application Of Self-Compacting Concrete In Japan, Europe And The United States,” in *International Symposium on High Performance Computing*, 5, 2003, Tokyo, 2003, pp. 1–20.
- [16] S. Rukzon and P. Chindaprasirt, “Use of Rice Husk-Bark Ash in Producing Self-Compacting Concrete,” *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2014, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1155/2014/429727.
- [17] A. M. D. A. Jasim, L. S. Wong, S. Y. Kong, A. W. Al-Zand, and M. A. K. Midhin, “An Evaluative Review of Recycled Waste Material Utilization in High-Performance Concrete,” *Civ. Eng. J.*, vol. 9, no. 11, pp. 2927–2957, Nov. 2023, doi: 10.28991/CEJ-2023-09-11-020.
- [18] R. A., P. P., S. S., and P. B., “Environment friendly sustainable concrete produced from marble waste powder,” *Glob. NEST J.*, pp. 1–9, May 2024, doi: 10.30955/gnj.005204.
- [19] Angelina Eva Lianasari, “Studi Pustaka Potensi High Volume Fly Ash Concrete Sebagai Material Beton Yang Sustainable Untuk Diterapkan Di Indonesia,” *Konf. Nas. Tek. Sipil*, vol. 1, no. 2, Feb. 2024, doi: 10.62603/konteks.v1i2.28.

- [20] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, "Sustainable development and climate change initiatives," *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.008.
- [21] O. Onuaguluchi, R. Ratu, and N. Banthia, "Effect of sodium sulfate activation on the early-age matrix strength and steel fiber bond in high volume fly ash (HVFA) cement mortar," *Constr. Build. Mater.*, vol. 341, p. 127808, Jul. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127808.
- [22] N. Singh, P. Kumar, and P. Goyal, "Reviewing the behaviour of high volume fly ash based self compacting concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 26, p. 100882, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100882.
- [23] Z. Guo, T. Jiang, J. Zhang, X. Kong, C. Chen, and D. E. Lehman, "Mechanical and durability properties of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag and silica fume," *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117115, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117115.
- [24] F. A. Mustapha, A. Sulaiman, R. N. Mohamed, and S. A. Umara, "The effect of fly ash and silica fume on self-compacting high-performance concrete," *Mater. Today Proc.*, vol. 39, pp. 965–969, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.04.493.
- [25] A. P. Abriantoro, "Pengaruh Fly Ash Sebagai Substitusi Semen Terhadap Durasi Initial Setting Time, Flowability Dan Kuat Tekan Umur 1 Hari Beton Self-Compacting Concrete (SCC) Dengan Penambahan 0,15% Citric Acid," *J. Kaji. Tek. SIPIL*, vol. 7, no. 2, pp. 32–43, Jun. 2023, doi: 10.52447/jkts.v7i2.6852.
- [26] B. Jaelani and A. P. Abriantoro, "Studi Eksperimental Substitusi Fly Ash 30%, 35% dan 40 % Pada Beton SCC Terhadap Waktu Ikat, Flowability, Porositas dan Kuat Tekan Beton dalam Resistensi Asam Sulfat," vol. 10, no. 2, 2024.