

# PERBANDINGAN TINGKAT KEHALUSAN FLY ASH TERHADAP DURABILITAS DAN SIFAT MEKANIS HIGH VOLUME FINE FLY ASH-SELF COMPACTING CONCRETE

Fauzi Mubarak<sup>1)</sup>, Mochamad Solikin<sup>1,\*)</sup>, Sri Sunarjono<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Magister Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta  
Jl. A. Yani, Tromol Pos 1, Pabelan, Surakarta 57162

<sup>\*)</sup>Corresponding Author: msolikin@ums.ac.id

## Abstract

Construction made from concrete, both conventional concrete and Self Compacting Concrete (SCC), which contact with seawater, often run into decreased durability due to the content of chemical compounds that are harmful for concrete, such as Magnesium Sulfate ( $MgSO_4$ ) and Chloride (Cl). One way to overcome this problem is to use fine fly ash in the concrete mixture. This article discusses the results of an experimental study on the use of fine fly ash in High Volume Fly Ash- Self Compacting Concrete on durability and mechanical properties. Fine fly ash used is processed using the fly ash filtering method with a water filter. The research method is a laboratory experiment by making concrete test objects. Durability tests include Volume of Permeable Voids (VPV) and Rapid Chloride Penetration Test (RCPT), while mechanical properties is concrete compressive strength. The research results showed that using fine fly ash compared to concrete without fly ash or concrete with raw fly ash positively impacted increasing compressive strength, reducing concrete voids, and good resistance to chloride attack at low penetration levels.

**Keywords:** durability, mechanical properties, fine fly ash, self compacting concrete

## PENDAHULUAN

Bangunan yang bersinggungan langsung dengan lingkungan agresif seperti air laut yang mengandung senyawa kimia yang berbahaya bagi beton seperti *Magnesium Sulfat* ( $MgSO_4$ ) dan *Chloride* (Cl) akan membuat durabilitas beton menjadi menurun (Atiqurrohman et al., 2023). Suatu bangunan yang memerlukan perbaikan tentunya akan mengganggu aktivitas maupun produksi yang ada di bangunan tersebut. Untuk itu, konstruksi beton di lingkungan agresif dituntut untuk memiliki durabilitas yang baik tanpa adanya perbaikan atau rehabilitasi sehingga menunjang pemenuhan masa layan

beton (Paul et al., 2020). Durabilitas beton menjadi tolak ukur penting guna menunjang pemenuhan masa layan konstruksi beton (Zhao et al., 2020).

Peningkatan sifat mekanis dan durabilitas beton masih menjadi tantangan dengan penggunaan beberapa jenis bahan campuran beton seperti *fly ash* yang sekaligus dapat mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan semen (Saha, 2018)(Nawaz et al., 2020). Penggunaan *fly ash* telah menarik perhatian di bidang konstruksi karena kinerjanya yang luar biasa ketika digunakan sebagai bahan substitusi semen (Garg et al., 2023). Dalam perkembangannya, penggunaan *fly ash*

melebihi kadar 50% (*High Volume Fly Ash*) sebagai pengganti semen sudah banyak dilakukan dan berdampak positif pada sifat mekanis beton (Solikin & Setiawan, 2014). Selain itu, peningkatan sifat mekanis dan durabilitas beton *fly ash* dipengaruhi oleh faktor penting seperti kehalusan *fly ash* (*fine material*), morfologi *fly ash*, dan distribusi partikel ukuran *fly ash* (Moghaddam et al., 2019).

Sifat mekanis beton dapat menurun apabila permeabilitas beton tinggi, sebaliknya jika permeabilitas beton rendah dapat meningkatkan durabilitas beton serta mencegah korosi pada tulangan beton (Kara De Maeijer et al., 2020)(Sevim & Demir, 2019). Beton dengan durabilitas yang baik umumnya tersusun dari material yang memiliki kehalusan tinggi (*ultra fine material*) (Herath et al., 2020). Penggunaan *ultra fine material* menghasilkan kerapatan pengepakan yang tinggi, struktur mikro yang padat dan mempercepat aktivitas pozzolan pada beton (Shaikh & Supit, 2015). Penggunaan *ultra fine material* dapat meningkatkan hidrasi, struktur mikro, dan stabilitas komposit campuran beton berbasis semen (Gunasekara et al., 2020). Umumnya *ultra fine material* dihasilkan dari material dasar yang digiling dan dilakukan pemisahan partikel *ultra fine* melalui klasifikasi udara (Shaikh & Supit, 2015).

Peningkatan sifat mekanis dan durabilitas juga dapat dilakukan dengan metode *Self Compacting Concrete* (SCC). SCC merupakan beton dengan kemampuan mengisi, melewati, mengalir, dan mempertahankan homogenitas tanpa terjadi segregasi,

tanpa perlu dilakukan pemadatan tambahan dan memiliki *flowability* sehingga mampu mengalir memenuhi bekisting dan mencapai kepadatan tertingginya sendiri (EFNARC, 2002). SCC memiliki keunggulan dimana dalam penerapannya menggunakan kadar air dalam campuran yang rendah daripada beton normal sehingga kekuatan beton dapat meningkat.

Berdasarkan penelitian eksperimental sebelumnya, penggunaan *fly ash* berdampak baik pada beton normal maupun SCC seperti halnya dilaporkan oleh Siddique, (2011) yang menyimpulkan bahwa *fly ash* pada SCC dapat meningkatkan nilai kuat tekan beton. Selain penggunaan *fly ash* biasa, penggunaan *fly ash* yang dihaluskan juga memberikan dampak positif seperti peningkatan sifat mekanis dan durabilitas beton. Moghaddam et al., (2019) menyelidiki *fly ash* yang dihaluskan yang menyimpulkan bahwa panas hidrasi menurun seiring dengan peningkatan kadar *fly ash* dalam campuran yang menandakan aktivitas pozzolan yang meningkat dan struktur mikro yang padat. Pengembangan lain oleh Gunasekara et al., (2020) yang menyelidiki tentang mikrostruktur dan pengembangan kekuatan beton HVFA yang menyimpulkan bahwa terjadi peningkatan kepadatan dalam struktur mikronya.

Peningkatan workabilitas dan kepadatan beton yang tinggi berdasarkan hasil dari *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan penggunaan material salah satunya *fly ash* juga di laporkan oleh Chindaprasit et al., (2020) dalam risetnya. Meskipun

penggunaan *fine fly ash* memberikan peningkatan pada berbagai propertis beton, namun teknologi untuk memperoleh *fine fly ash* khususnya di Indonesia masih perlu dikembangkan. Maka penggunaan *fine fly ash* pada beton SCC masih belum banyak dilakukan.

Penelitian ini perlu dilakukan karena selain memberikan dampak positif pada lingkungan serta peningkatan sifat mekanis dan durabilitas beton, kajian mengenai pemanfaatan *fly ash* dengan ukuran yang lebih halus pada beton SCC masih minim dilakukan khususnya di Indonesia. Teknologi pemrosesan *fly ash* yang dihaluskan juga belum tersedia secara luas di Indonesia. Berdasarkan uraian diatas, artikel ini berfokus pada perbandingan tingkat kehalusan *fly ash* yang ditinjau dari parameter durabilitas dan sifat mekanis *High Volume Fine Fly Ash- Self Compacting Concrete*.

## **METODE PENELITIAN**

Metode penelitian yang akan dilakukan adalah dengan metode eksperimental yang dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta. Untuk mendapatkan *fine fly ash*, dilakukan proses *filtering fly ash* dengan saringan air berukuran  $\pm 10 \mu\text{m}$ . Menurut *National Precast Concrete Association* (NPCA) ukuran partikel rata-rata *raw fly ash* atau belum diproses adalah sekitar 20-30  $\mu\text{m}$ , sehingga diambil ukuran saringan dibawah 20  $\mu\text{m}$  untuk mendapatkan *fly ash* dengan ukuran yang lebih halus. Proses penyaringan *fly ash* yang lolos saringan yang terbawa air kemudian

ditiriskan dan dioven untuk mendapatkan *fine fly ash* dalam keadaan kering. Kemudian dilakukan proses peyaringan kembali dengan saringan No.200 guna memisahkan butiran *fly ash* yang menggumpal. Untuk memastikan ukuran butir telah sesuai perencanaan dan tidak ada reaktivitas *fly ash* akibat air, maka dilakukan uji *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *X-Ray Fluorence* (XRF). Uji SEM dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta sedangkan uji XRF dilakukan di Laboratorium Litbang PT Semen Indonesia.

Selain proses *filtering fly ash*, penyiapan bahan lain yang dipersiapkan seperti agregat halus, agregat kasar, semen, air dan *superplasticizer*. Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini seperti semen, *fly ash*, dan agregat halus berasal dari PT Solusi Bangun Beton yang berlokasi di Yogyakarta, sedangkan agregat kasar berasal dari PT Panca Beton Readymix yang berlokasi di Surakarta. *Fly ash* yang digunakan bersumber dari PLTU Tanjung Jati Jepar. Semua material tersebut dilakukan pengujian kualitas material terlebih dahulu dan memenuhi persyaratan material untuk campuran beton.

Metode perencanaan beton menggunakan metode ACI Committe 211, (2006) dengan beberapa penyesuaian melalui *trial mix* untuk menentukan proporsi *Self Compacting Concrete* (SCC) dengan kuat tekan  $f'c = 45 \text{ MPa}$ . Pembuatan variasi campuran terdiri dari beton SCC, beton SCC

dengan 50% *raw fly ash* (HVFA-SCC), beton SCC dengan 50% *fine fly ash*

(HVFFA-SCC). Hasil perencanaan beton dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil perencanaan campuran beton

No	Jenis Sampel	Komposisi Campuran per m <sup>3</sup>							Berat Volume (kg/m <sup>3</sup> )
		Semen (kg)	<i>Fly Ash</i> (kg)	<i>Fine Fly Ash</i> (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Air (lt)	SP (lt)	
1	SCC	566,67	0	0	965,28	658,67	170	8,5	2369,12
2	HVFA-SCC	283,33	283,33	0	939,69	641,21	170	8,5	2326,06
3	HVFFA-SCC	283,33	0	283,33	939,69	641,21	170	8,5	2326,06

Benda uji terdiri dari silinder dengan ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk pengujian kuat tekan beton, silinder dengan ukuran diameter 10 cm dan tinggi 20 cm untuk pengujian penetrasi ion klorida dan pengujian *volume of permeable voids*. Sebelum

dilakukan uji penetrasi ion klorida dan VPV, benda uji dipotong menjadi berukuran diameter 10 cm dan tinggi 5 cm. Uji *slump flow* juga dilakukan pada saat setelah pencampuran adukan beton selesai. Matrik benda uji yang dibuat ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Matrik benda uji

Jenis Sampel	Umur Uji	Jumlah Sampel Pengujian	
		Kuat Tekan Silinder : Ø15cm x 30cm	Penetrasi Ion Klorida dan VPV Silinder : Ø10cm x 5cm
SCC	28	4	2
HVFA-SCC	28	4	2
HVFFA-SCC	28	4	2
Σ		12	6

Sebelum dilakukan proses pengujian beton, dilakukan proses perawatan beton berupa curing beton di dalam air selama 28 hari. Pengujian kuat tekan, penetrasi ion klorida, pengujian *volume of permeable voids* dilakukan pada umur uji 28 hari. Hasil pengujian pengujian tersebut merupakan data yang digunakan sebagai data analisa dari penelitian ini. Hasil data pengujian kemudian dilakukan analisa dan pembahasan yang dilanjutkan dengan pembuatan laporan serta luaran yang

sudah ditargetkan. Proses pengolahan data dilakukan dengan bantuan *software Microsoft Office (Word & Excel)*.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pengujian *X-Ray Fluorence (XRF)*

Pengujian *X-Ray Fluorence* dilakukan untuk mengetahui penentuan jenis dan perbandingan kandungan kimiawi *raw fly ash* dan *fine fly ash* dan juga untuk mengetahui apakah ada reaktivitas *fly ash* dengan air pada saat proses

penyaringan *fly ash* dengan saringan air. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian XRF

Parameter	Satuan	Hasil Uji		Metode
		<i>Raw Fly Ash</i>	<i>Fine Fly Ash</i>	
SiO <sub>2</sub>	%	42,59	46,10	XRF Uniquant
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	19,42	19,42	XRF Uniquant
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	11,03	11,25	XRF Uniquant
CaO	%	12,15	11,89	XRF Uniquant

Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat bahwa total SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada kedua sample *raw fly ash* dan *fine fly ash* lebih dari 70% yang menandakan bahwa *fly ash* tersebut masuk dalam kelas *fly ash* tipe F (SNI 2460-2014, 2014). Reaktivitas juga tidak terjadi akibat proses *filtering* dengan saringan air yang karena *fly ash* akan bereaksi jika bercampur dengan Ca(OH)<sub>2</sub> yang biasanya dihasilkan oleh proses hidrasi semen. *Fly ash* akan bereaksi dengan Ca(OH)<sub>2</sub> yang akan membentuk gel C-S-H pada beton.

#### **Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)**

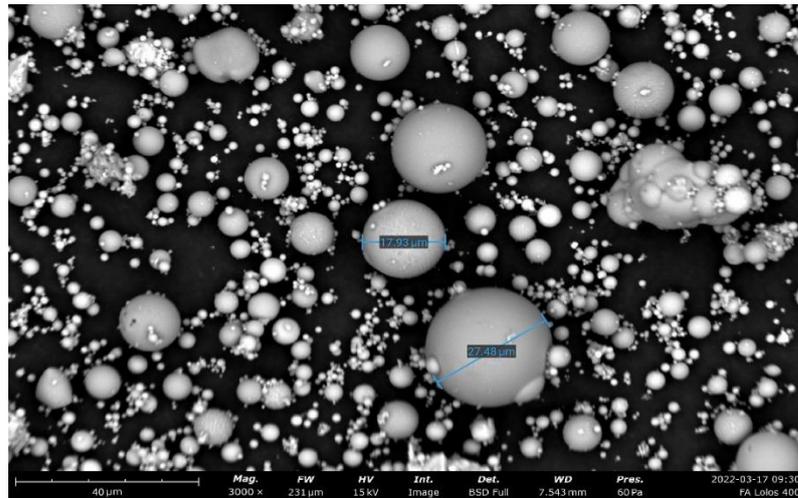
Pengujian Scanning Electron Microscope dilakukan untuk memastikan bahwa *fine fly ash* yang digunakan memiliki ukuran butir sesuai yang direncanakan yaitu ±10 µm. Selain itu juga digunakan sebagai perbandingan tingkat ukuran kehalusan dengan *raw fly ash*. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Berdasarkan hasil pengujian SEM pada Gambar 1 dan Gambar 2, dapat dilihat bahwa masih terdapat beberapa butir *fly ash* yang memiliki diameter

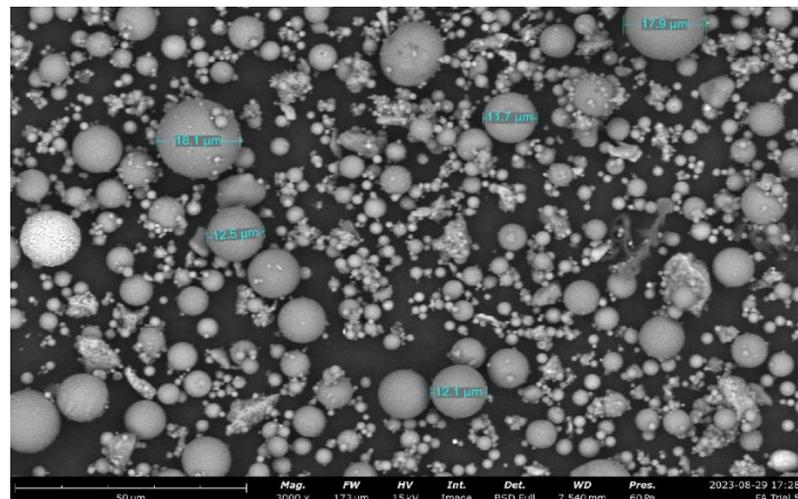
lebih dari ±10 µm. Akan tetapi beberapa ukuran butiran *fly ash* tersebut berikisar tidak lebih dari ±20 µm. Hal ini menandakan bahwa *fly ash* dengan proses *filtering* saringan air tersebut masih belum terlalu efektif namun masih bisa dikatakan dalam kategori *fine fly ash*. Menurut National Precast Concrete Association (NPCA) ukuran partikel rata-rata *raw fly ash* atau belum diproses adalah sekitar 20-30 µm dan yang terbesar pada 100 µm. Apabila *fine fly ash* dibandingkan dengan *raw fly ash*, *fine fly ash* memiliki butiran yang lebih kecil (<20 µm) yang mana pada *raw fly ash* masih terdapat butiran >20 µm

#### **Pengujian Ikatan Awal Semen**

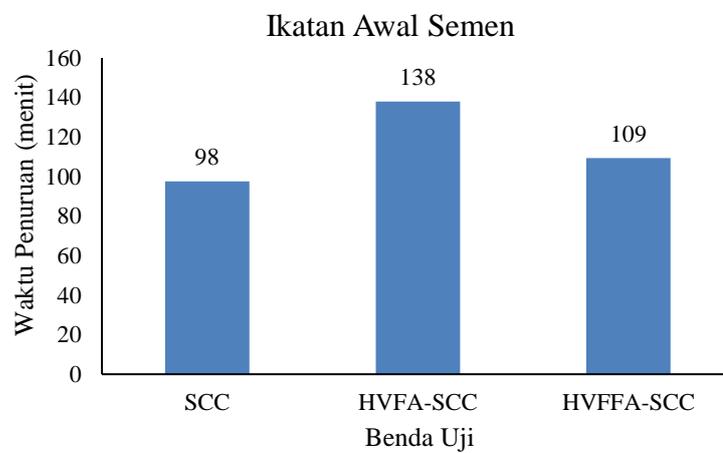
Pengujian ikatan awal semen dilakukan berdasarkan metode uji SNI 03-6827, (2002) dengan menggunakan alat uji vicat. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui waktu ikatan semen dari kondisi elastis menjadi plastis dengan mengukur penurunan penetrasi dengan jarum vicat dengan interval waktu pembacaan 15 menit hingga mencapai penurunan sebesar 25 mm. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 1. Uji SEM *raw fly ash*



Gambar 2. Uji SEM *fine fly ash*



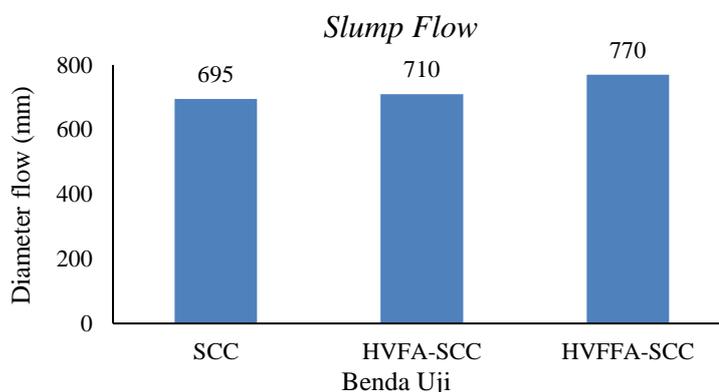
Gambar 3. Hasil uji ikatan awal semen

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 3, didapatkan hasil waktu ikat awal campuran yang menggunakan *raw fly ash* (HVFA-SCC) memiliki waktu ikat paling lama jika dibandingkan dengan campuran lainnya. Hal ini disebabkan karena rantai reaksi kimia *fly ash* pada saat proses hidrasi semakin panjang sehingga menyebabkan menyebabkan waktu ikatnya juga semakin lama (Pratiwi et al., 2020). Penggunaan *fine fly ash* dapat mengurangi waktu ikat awal menjadi lebih cepat karena terjadi peningkatan aktivitas pozzolanik sehingga waktu ikatnya juga semakin cepat (Shaikh & Supit, 2015). Selain itu penggunaan *fine fly ash* membutuhkan air yang lebih

sedikit untuk mencapai konsistensi normal karena ukuran butiran *fine fly ash* yang lebih halus sehingga berpengaruh terhadap percepatan waktu ikatnya (Feng et al., 2020)

### Pengujian Slump Flow

Pengujian *slump flow* mengacu pada standar uji menurut EFNARC,(2002) yang dimaksudkan untuk mengetahui tingkat *flowability* dan *workability* dari campuran beton yang dibuat. Pengujian *slump flow* dilakukan ketika campuran beton yang sudah dibuat sudah tercampur secara merata dan sebelum dilakukan pencetakan benda uji. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil uji *slump flow*

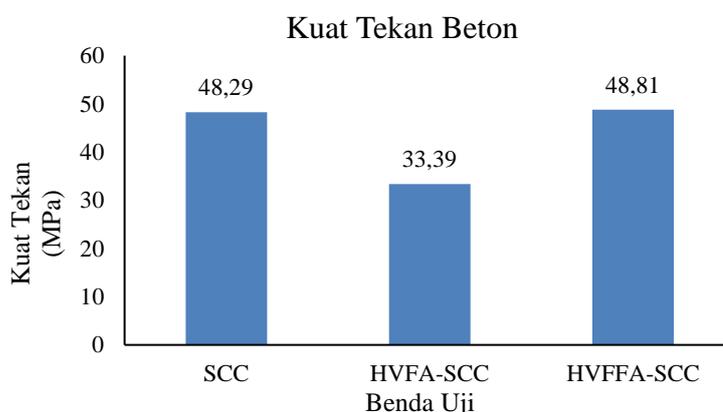
Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 4 terjadi peningkatan *slump flow* pada campuran dengan penambahan *fly ash* baik pada campuran HVFA-SCC maupun HVFFA-SCC. Hal ini menandakan bahwa penggunaan *fly ash* dapat meningkatkan *flowability* beton karena *fly ash* memiliki ukuran butiran yang lebih halus daripada semen dan bentuk fisik butiran *fly ash* berbentuk bulat

sehingga dapat mengurangi gesekan dan meningkatkan *flowability* (Trisnoyuwono, 2015). Penggunaan *fine fly ash* pada berbagai penelitian sebelumnya cenderung memiliki kemampuan penyerapan air yang lebih sedikit daripada *raw fly ash* karena ukuran butiran yang lebih halus serta luas permukaan yang lebih tinggi (Shaikh & Supit, 2015). Dengan penggunaan air yang lebih sedikit

tersebut dapat menurunkan *flowability* beton. Namun pada penelitian ini dengan penggunaan jumlah air yang sama pada ketiga campuran, membuat campuran dengan *fine fly ash* memiliki *flowability* yang lebih tinggi karena *flowability* dipengaruhi oleh jumlah air dalam campuran beton.

### Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton mengacu pada standar uji SNI 2493:2011,(2011) yang dilakukan dengan alat uji *Compression Testing Machine* (CTM). Pengujian dilakukan pada umur uji 28 hari dengan sampel uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.



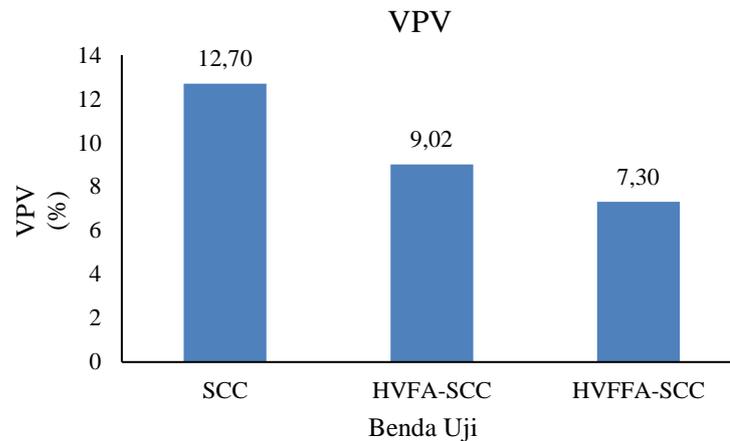
Gambar 5. Hasil uji kuat tekan

Berdasarkan hasil data pada Gambar 5 dapat diketahui bahwa campuran HVFA-SCC memiliki nilai kuat tekan paling rendah dibandingkan dengan dua campuran lainnya. Penggunaan *raw fly ash* pada campuran HVFA-SCC menghasilkan nilai kuat tekan yang lebih rendah pada umur awal karena reaksi pozzolan dari *fly ash* yang lambat (Rashad, 2015) . Penggunaan *fine fly ash* pada campuran HVFFA-SCC mampu meningkatkan kuat tekan beton sebesar 46,3% pada umur 28 hari jika dibandingkan dengan penggunaan *raw fly ash* pada campuran HVFA-SCC. Bahkan apabila dibandingkan dengan campuran SCC, nilai kuat tekan HVFFA-SCC sedikit lebih diatas kuat tekan SCC. Peningkatan ini terjadi karena *fine fly ash* memiliki ukuran

partikel yang lebih halus dibandingkan *raw fly ash* yang menyebabkan peningkatan reaksi pozzolan dan pengisian rongga pori pada beton (Supit et al., 2014). Kandungan SiO<sub>2</sub> pada *fine fly ash* juga sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan *raw fly ash* pada pengujian XRF yang juga berpengaruh pada peningkatan kuat tekan beton.

### Pengujian Volume of Permeable Voids (VPV)

Pengujian VPV merupakan salah satu parameter pengujian durabilitas beton yang pelaksanaan pengujiannya mengacu pada standar uji menurut ASTM C642-06, (1997) pada umur uji 28 hari. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 6. Hasil uji VPV

Berdasarkan hasil pengujian pada Gambar 6, nilai VPV dari yang tertinggi ke terendah adalah campuran SCC sebesar 12,7%, campuran HVFA-SCC sebesar 9,02% dan yang paling rendah pada campuran HVFFA-SCC sebesar 7,30%. Berdasarkan hasil tersebut dapat diketahui bahwa penggunaan *fly ash* dapat menurunkan persentase rongga pada beton. Penurunan persentase rongga pada campuran HVFA-SCC jika dibandingkan beton tanpa *fly ash* sebesar 40,7%. Peningkatan kehalusan

*fly ash* pada campuran HVFFA-SCC semakin menurunkan persentase rongga pada beton hingga sebesar 73,9%. Apabila campuran HVFFA-SCC dibandingkan dengan HVFA-SCC, maka penurunan persentase rongga pada beton sebesar 23,5%. Penurunan persentase rongga pada beton tersebut karena *fly ash* memiliki ukuran partikel butiran yang lebih halus sehingga mampu mengisi rongga-rongga pada beton (Shaikh & Supit, 2015).

Tabel 4. *VicRoads classification for concrete durability based on the VPV (Cement Concrete & Aggregates, 2009)*

<i>Durability Classification Indicator</i>	<i>Vibrated Cylinders (VPV %)</i>	<i>Rodded Cylinders (VPV %)</i>	<i>Cores (VPV %)</i>
<i>Excellent</i>	<11	<12	<14
<i>Good</i>	11-13	12-14	14-16
<i>Normal</i>	13-14	14-15	16-17
<i>Marginal</i>	14-16	15-17	17-19
<i>Bad</i>	>16	>17	>19

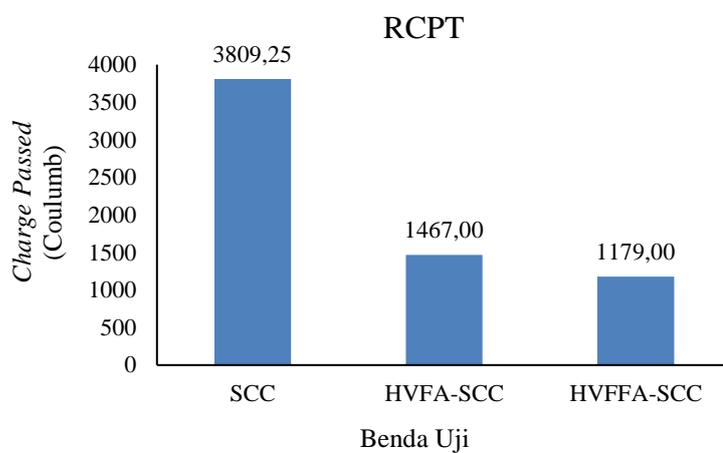
Berdasarkan klasifikasi pada Tabel 4 pada parameter *vibrated cylinder*, campuran SCC masuk dalam klasifikasi durabilitas beton yang baik, sedangkan

campuran HVFA-SCC dan HVFFA-SCC masuk klasifikasi durabilitas beton yang sangat baik.

### Pengujian Penetrasi Ion Klorida (*Rapid Chloride Penetration Test*)

Pengujian RCPT juga merupakan salah satu parameter pengujian durabilitas beton yang pelaksanaan ujinya mengacu pada standar uji menurut ASTM C1202, (2012) pada umur uji 28 hari. Pengujian ini dilakukan dengan mengalirkan arus DC pada kedua

*voltage cell body* yang berisi masing-masing larutan 3% NaCl dan 0,3N NaOH. Sampel beton yang digunakan berukuran diameter 10 cm dan tinggi 5 cm. Durasi pengujian selama 6 jam dengan mencatat arus yang lewat tiap 30 menit. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Hasil uji RCPT

Tabel 5. *Chloride ion penetrability based on charge passed* (ASTM C1202, 2012)

<i>Charge Passed</i>	<i>Chloride Ion Penetrability</i>
>4000	<i>High</i>
2000-4000	<i>Moderate</i>
1000-2000	<i>Low</i>
100-1000	<i>Very Low</i>
<100	<i>Negligible</i>

Berdasarkan Gambar 7 dan Tabel 5 didapatkan nilai RCPT beton SCC, HVFA-SCC, dan HVFFA-SCC berturut turut sebesar 3809,25 coulomb, 1467 coulomb, dan 1179 coulomb. Tingkat penetrasi klorida pada sampel SCC adalah tingkat sedang, sedangkan sample HVFA-SCC dan HVFFA-SCC adalah tingkat rendah. Penambahan *fly ash* mampu menurunkan tingkat penetrasi klorida pada beton (Solikin et

al., 2021). Penurunan tingkat penetrasi klorida tersebut karena *fly ash* mampu mengisi pori dengan partikel halus. Penggunaan *fine fly ash* pada campuran HVFFA-SCC juga membuktikan bahwa partikel yang lebih halus pada *fly ash* mampu merubah struktur mikro beton dan penyempurnaan penutupan pori pada beton sehingga kemampuan klorida untuk penetrasi pada beton juga

semakin menurun (Shaikh & Supit, 2015).

## SIMPULAN

Penggunaan *fine fly ash* pada campuran HVFFA-SCC berdampak positif terhadap peningkatan kuat tekan beton pada pengujian kuat tekan beton sebesar 46,3% terhadap campuran HVFA-SCC yang menggunakan *raw fly ash*, volume rongga pada beton menjadi berkurang pada pengujian VPV sebesar 23,5% terhadap campuran *raw fly ash*, serta ketahanan beton terhadap serangan klorida menjadi lebih baik pada level penetrasi klorida rendah pada pengujian RCPT.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi melalui skema Penelitian Tesis Magister (PTM) Tahun Anggaran 2023 dengan nomor kontrak 182/E5/PG.02.00.PL/2023; 006/LL6/PB/AL.04/2023, 170.46/C.1-III/LRI/VI/2023. Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT Solusi Bangun Beton, PT Panca Beton Readymix, Laboratorium Teknik Sipil UMS atas dukungan material penelitian dan pelaksanaan penelitian.

## DAFTAR PUSTAKA

ACI Committe 211, 2006, *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. 9, 120–121.

ASTM C 642-06, 1997, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,

ASTM International, United States. In *American Society for Testing and Materials*. (Issue March).

ASTM C1202, 2012, *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*.

Atiqurrohman, M., Utami, N.M., & Nurtanto, D., 2023, Korelasi Kuat Tekan Beton Dan Ketahanan Sulfat Pada Beton Normal Dengan Penambahan Kaolin Sebagai Substitusi Parsial Semen. *Teras Jurnal*, 13 (1).

Cement Concrete & Aggregates, 2009, Chloride Resistance of Concrete. In *Cement Concrete & Aggregates Australia* (Issue June).

Chindaprasirt, P., Kroehong, W., Damrongwiriyanupap, N., Suriyo, W., & Jaturapitakkul, C., 2020, Mechanical properties, chloride resistance and microstructure of Portland fly ash cement concrete containing high volume bagasse ash. *Journal of Building Engineering*, 31 (April), 101415.

EFNARC, 2002, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete. *Report from EFNARC*, 44 (February), 32.

Feng, T., Jiang, J., Chu, H., Wang, L., Science, M., & Engineering, C., 2020, Effect of Ultra-Fine Fly Ash on The Mechanical and Shrinkage Properties of Ultra-High Performance. *4th International RILEM Conference on Microstructure Related*

- Durability of Cementitious Composites*, 1, 534–540.
- Garg, R., Garg, R., Eddy, N.O., Khan, M.A., Khan, A.H., Alomayri, T., & Berwal, P., 2023, Mechanical strength and durability analysis of mortars prepared with fly ash and nano-metakaolin. *Case Studies in Construction Materials*, 18 (November 2022), e01796.
- Gunasekara, C., Zhou, Z., Law, D.W., Sofi, M., Setunge, S., & Mendis, P., 2020, Microstructure and strength development of quaternary blend high-volume fly ash concrete. *Journal of Materials Science*, 55 (15), 6441–6456.
- Herath, C., Gunasekara, C., Law, D.W., & Setunge, S., 2020, Performance of high volume fly ash concrete incorporating additives: A systematic literature review. *Construction and Building Materials*, 258, 120606.
- Kara De Maeijer, P., Craeye, B., Snellings, R., Kazemi-Kamyab, H., Loots, M., Janssens, K., & Nuyts, G., 2020, Effect of ultra-fine fly ash on concrete performance and durability. *Construction and Building Materials*, 263, 120493.
- Moghaddam, F., Sirivivatnanon, V., & Vessalas, K., 2019, The effect of fly ash fineness on heat of hydration, microstructure, flow and compressive strength of blended cement pastes. *Case Studies in Construction Materials*, 10 (2018), e00218.
- Nawaz, M.A., Ali, B., Qureshi, L.A., Usman Aslam, H.M., Hussain, I., Masood, B., & Raza, S.S., 2020, Effect of sulfate activator on mechanical and durability properties of concrete incorporating low calcium fly ash. *Case Studies in Construction Materials*, 13.
- Paul, S.C., van Zijl, G.P.A.G., & Šavija, B., 2020, Effect of fibers on durability of concrete: A practical review. *Materials*, 13 (20), 1–26.
- Pratiwi, W.D., Triwulan, Ekaputri, J.J., & Fansuri, H., 2020, Combination of precipitated-calcium carbonate substitution and dilute-alkali fly ash treatment in a very high-volume fly ash cement paste. *Construction and Building Materials*, 234, 117273.
- Rashad, A.M., 2015, An exploratory study on high-volume fly ash concrete incorporating silica fume subjected to thermal loads. *Journal of Cleaner Production*, 87, 735–744.
- Saha, A.K., 2018, Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28 (1), 25–31.
- Sevim, Ö., & Demir, İ., 2019, Physical and permeability properties of cementitious mortars having fly ash with optimized particle size distribution. *Cement and Concrete Composites*, 96, 266–273.
- Shaikh, F.U.A., & Supit, S.W.M., 2015, Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes

- containing ultrafine fly ash (UFFA). *Construction and Building Materials*, 82, 192–205.
- Siddique, R., 2011, Properties of Self-Compacting Concrete Containing Class F Fly Ash. *Materials and Design*, 32 (3), 1501–1507.
- SNI 03-6827, 2002, Metode Pengujian Waktu Ikat Awal Semen Portland dengan Menggunakan Alat Vicat untuk Pekerjaan Sipil. In *Badan Standardisasi Nasional*.
- SNI 2460-2014, 2014, Spesifikasi Abu Terbang Batubara dan Pozolan Alam Mentah atau yang Telah Dikalsinasi untuk Digunakan dalam Beton. *Badan Standardisasi Nasional Indonesia*, 16.
- SNI 2493:2011, 2011, Tata cara pembuatan dan perawatan benda uji beton di laboratorium. *Badan Standardisasi Nasional*.
- Solikin, Mochamad, & Setiawan, B., 2014, Mechanical properties of class C high volume fly ash concrete with lime water as mixing water. *Applied Mechanics and Materials*, 660, 312–316.
- Solikin, Mochammad, Ihsan, I.N., Setiawan, B., & Nurchasanah, Y., 2021, Analisis Kehalusan Fly Ash Sebagai Bahan Substitusi Semen Ash Mutu Normal. *CEEDRiMS*, 157–163.
- Supit, S.W.M., Shaikh, F.U.A., & Sarker, P.K., 2014, Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, 51, 278–286.
- Trisnoyuwono, D., 2015, Pengaruh Penambahan Fly Ash Terhadap Sifat Workability Dan Sifat Fisik - Mekanik Beton Non Pasir Dengan Agregat Alwa Asal Cilacap. *Rekayasa Sipil*, 9, pp.29-36.
- Zhao, N., Wang, S., & Li, B., 2020, Durability of fibre concrete containing high-volume fly ash in complicated environment. *Emerging Materials Research*, 9 (3), 825–830.