



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

Bagus Jaelani¹ dan Adji Putra Abriantoro^{2*}

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta, Jakarta

*adji.putra@uta45jakarta.ac.id

ABSTRACT

Concrete quality is often affected by the lack of optimal compaction. Self-Compacting Concrete (SCC) technology offers a solution with its ability to self-flow and fill molds without manual compaction. However, the production of cement required for concrete is bad for the environment as it accounts for about 5% of total CO₂ emissions. Fly ash is a waste from power plants, provides an alternative by reducing the need for cement. This study aims to determine the effect of fly ash substitution in SCC concrete with levels of 0%, 30%, 35%, and 40% on binding time, flowability, porosity and compressive strength of concrete at the age of 28 days with soaking in 2% sulfuric acid solution for 21 days. The tests were conducted at the Materials and Construction Laboratory of the Faculty of Engineering, Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta. The research showed that the highest result of fly ash substitution occurred at 40% content with the result of increasing the initial setting time by 100%, increasing 77% (final setting), increasing the flowability by 12% but decreasing the porosity rate by 39% and increasing the strength and resistance of SCC concrete to sulfuric acid by 58% compared to normal SCC concrete without fly ash. It can be seen that the higher content of fly ash in the SCC concrete mixture can increase the strength, resistance to sulfuric acid and efficiency in working with SCC concrete, but can extend the pavement time of SCC concrete.

Keywords: fly ash, Self-Compacting Concrete (SCC); compressive strength; sulfuric acid; resistance

ABSTRAK

Kualitas beton sering kali terpengaruh oleh kurangnya pemadatan yang optimal. Teknologi *Self-Compacting Concrete* (SCC) menawarkan solusi dengan kemampuannya untuk mengalir sendiri dan mengisi cetakan tanpa pemadatan manual. Namun, produksi semen yang diperlukan untuk beton berdampak buruk bagi lingkungan karena menyumbang sekitar 5% dari total emisi CO₂. *Fly ash* merupakan limbah dari PLTU yang menjadi alternatif dengan mengurangi kebutuhan semen. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh substitusi *fly ash* pada beton SCC dengan kadar 0%, 30%, 35%, dan 40% terhadap waktu pengikatan, *flowability*, porositas dan kuat tekan beton pada umur 28 hari dengan perendaman dalam larutan asam sulfat sebesar 2% selama 21 hari. Pengujian dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta. Penelitian menunjukkan hasil tertinggi substitusi *fly ash* terjadi di kadar 40% dengan hasil peningkatan waktu ikat awal sebesar 100% (*initial setting*), peningkatan 77% (*final setting*), peningkatan *flowability* sebesar 12% namun menurunkan angka porositas hingga 39% dan meningkatkan kekuatan dan ketahanan beton SCC terhadap asam sulfat sebesar 58% dibandingkan beton SCC normal tanpa *fly ash*. Terlihat bahwa semakin tinggi kandungan *fly ash* dalam campuran beton SCC dapat meningkatkan kekuatan, ketahanan terhadap asam sulfat dan efisiensi dalam pengerjaan beton SCC, namun dapat memperpanjang waktu perkerasan beton SCC itu sendiri.

Kata kunci: fly ash; self compacting concrete (SCC); kuat tekan; asam sulfat; resistensi

1. PENDAHULUAN

Pada bidang industri terutama konstruksi bangunan, pekerjaan beton menjadi peranan penting. Hampir seluruh bangunan yang didirikan seperti jembatan, jalan, gedung, irigasi dan yang lainnya selalu

membutuhkan pekerjaan beton, baik itu beton struktural maupun non struktural[1]. Semakin berkembangnya teknologi konstruksi terutama dalam pekerjaan beton itu sendiri menimbulkan banyak permasalahan, salah satu permasalahan yang umum terjadi adalah penurunan mutu beton yang dihasilkan. Salah satu faktor penyebabnya adalah kurangnya pemadatan beton segar dengan baik yang disebabkan pemadatan beton yang dilakukan secara manual, sehingga mengakibatkan kurang optimalnya kepadatan beton yang berdampak pada penurunan kemampuan beton itu sendiri. Untuk mengatasi hal tersebut digunakan teknologi *self-compacting concrete* (SCC)[2]. Beton SCC sendiri merupakan beton yang mampu mengalir sendiri mengisi celah dalam cetakan dengan tingkat pemadatan rendah atau tidak sama sekali, dikarenakan beton SCC membatasi ukuran agregat maksimal 25 mm, dan menggunakan bahan tambah admixture superplasticizer untuk mencapai keenceran tertentu yang memungkinkan beton segar dapat mengalir sendiri dalam cetakan[3].

Selain itu tingginya permintaan akan beton dalam bidang konstruksi membawa dampak buruk bagi lingkungan, utamanya karena produksi semen menyumbang sekitar 5% dari total emisi CO² antropogenik dan 12-15% dari penggunaan energi global di sektor industri. Selain itu, peningkatan infrastruktur di Indonesia yang tercermin dari kenaikan kebutuhan listrik sebesar 4,75% dari tahun 2020 sampai 2021 juga berdampak pada peningkatan limbah industri[4]. Salah satu sumber utama limbah tersebut adalah bersumber dari industri Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menghasilkan polutan padat berupa *fly ash*. Di Indonesia, menurut Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)[5]. Ini disebabkan oleh potensi adanya kandungan bahan berbahaya seperti logam berat di dalam *fly ash* yang dapat membahayakan kesehatan manusia dan lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Namun, ada juga upaya untuk memanfaatkan *fly ash* dalam berbagai aplikasi, seperti dalam industri konstruksi sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam campuran beton. Penggunaan *fly ash* ini didorong oleh sifat-sifatnya yang dapat meningkatkan kualitas beton, serta upaya untuk mengurangi jumlah limbah yang harus dibuang. Meskipun demikian, pemanfaatan *fly ash* harus dilakukan dengan mematuhi peraturan yang berlaku untuk memastikan bahwa penggunaannya tidak menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian semen dalam pembuatan beton, seperti pada *Self-Compacting Concrete* (SCC) menjadi alternatif yang potensial untuk mengurangi dampak lingkungan dari industri konstruksi sekaligus memanfaatkan limbah yang ada.[6]

Upaya untuk menekan penggunaan semen dan mengurangi limbah *fly ash* dari PLTU adalah dengan menggunakan *fly ash* dalam campuran beton. *Fly ash* memiliki kandungan oksida silika (SiO₂), oksida aluminium (Al₂O₃), oksida besi (Fe₂O₃), dan kalsium oksida (CaO) yang unik, menjadikannya bahan tambahan dalam meningkatkan kinerja dan durabilitas beton *self-compacting concrete* (SCC)[7]. Partikel halus *fly ash* yang berbentuk bulat meningkatkan *workability* beton SCC, mengurangi porositas dengan mengisi celah mikro, serta mengurangi suhu puncak selama hidrasi beton sehingga mengurangi risiko retak akibat panas[8]. Dikarenakan *fly ash* mempengaruhi panas hidrasi beton, sehingga dapat membuat melambatnya waktu pengikatan beton itu sendiri[2]. *Fly ash* juga mengurangi *bleeding*, meningkatkan kualitas permukaan beton, dan memperkuat ketahanan terhadap serangan kimia seperti sulfat dan klorida melalui reaksi pozzolanik. Dengan demikian, pemanfaatan *fly ash* tidak hanya meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan beton, tetapi juga memberikan solusi berkelanjutan dengan memanfaatkan limbah industri[9]. *Fly ash* juga berkontribusi dalam mengurangi susut beton, serta memiliki dampak positif terhadap lingkungan dengan mengurangi kebutuhan penggunaan semen dan memanfaatkan limbah yang ada[10]. Perkembangan lebih lanjut dalam penggunaan *fly ash* telah melampaui batasan yang diperkenankan pada beton konvensional yang dikenal dengan istilah *high volume fly ash self-compacting*

concrete (HVFA SCC). Pada komposisi HVFA, *fly ash* mendominasi volume semen dalam beton yang berarti proporsi *fly ash* jauh lebih tinggi dibandingkan dengan beton biasa[11].

Beton juga merupakan material konstruksi yang sering terpapar berbagai kondisi lingkungan yang agresif, salah satunya adalah serangan asam sulfat. Asam sulfat dapat merusak struktur beton melalui proses kimiawi yang mengakibatkan degradasi material. Ketika beton terpapar asam sulfat, ion-ion sulfat bereaksi dengan kalsium hidroksida yang terkandung dalam beton, membentuk kalsium sulfat dan senyawa lain yang dapat menyebabkan ekspansi dan retak pada beton[12]. Hal ini mengurangi kekuatan struktural dan daya tahan beton. Oleh karena itu, penelitian mengenai resistensi beton terhadap serangan asam sulfat sangat penting untuk memastikan keberlanjutan dan keamanan struktur beton dalam jangka panjang. Dalam upaya meningkatkan resistensi beton terhadap serangan asam sulfat, substitusi bahan tambahan seperti *fly ash* menjadi alternatif yang menjanjikan, karena *fly ash* dapat memperbaiki sifat-sifat kimia dan fisik beton, sehingga meningkatkan ketahanan beton terhadap kondisi lingkungan yang korosif[12].

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh substitusi *fly ash* dengan kadar 0%, 30%, 35%, dan 40% terhadap berbagai karakteristik penting beton SCC. Karakteristik yang diteliti meliputi waktu pengikatan awal dan akhir (*initial setting time* dan *final setting time*), *flowability*, porositas dan kuat tekan beton pada umur 28 hari. Dalam penelitian ini juga akan menguji resistensi beton terhadap kondisi lingkungan asam sulfat dengan konsentrasi 2% selama 28 hari perendaman. Pemilihan perendaman dalam asam sulfat bertujuan untuk mensimulasikan kondisi lingkungan agresif yang sering kali ditemui dalam berbagai aplikasi konstruksi. Hal ini penting untuk memahami bagaimana beton dengan substitusi *fly ash* dapat bertahan dalam kondisi korosif, memberikan gambaran yang lebih komprehensif tentang ketahanan dan keandalan beton dalam berbagai kondisi lingkungan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam upaya mengurangi penggunaan semen dan memanfaatkan limbah *fly ash*, serta menghasilkan beton yang lebih ramah lingkungan dan memiliki kinerja yang baik.

2. METODE PENELITIAN

Rangkaian pengujian eksperimental ini dilakukan di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas 17 Agustus 1945 Jakarta. Pengujian tersebut terdiri atas pengujian bahan, pengujian waktu pengikatan (*initial setting time* dan *final setting time*), *flowability*, pengujian porositas, pengujian kuat tekan beton umur 28 hari dengan resistensi asam sulfat sebesar 2% selama 21 hari. Total jumlah benda uji 36 buah tersaji dalam tabel berikut :

Tabel 1. Jumlah benda uji

Kadar <i>Fly ash</i>	Pengujian Porositas	Pengujian Kuat Tekan
0 %	6	3
30%	6	3
35%	6	3
40%	6	3

2.1 Pengujian Agregat

Pengujian agregat merupakan tes yang dilakukan guna mengevaluasi kualitas dan karakteristik agregat yang akan digunakan dalam campuran beton, agregat disini berupa pasir, kerikil atau batu pecah, pengujian agregat merupakan faktor penting dalam memberikan kekuatan dan stabilitas terhadap beton itu sendiri,

pengujian dilakukan dengan menguji berat jenis, penyerapan air, analisis saringan, modulus halus butir, pengujian kadar lumpur agregat kasar dan agregat halus yang mengacu pada standar ASTM C 136[13] ASTM C 70[14]. Agregat kasar yang digunakan adalah pecahan batu kali dan agregat halus yang digunakan adalah pasir Bangka,

2.2 Pengujian Waktu Ikat

Pengujian waktu ikat beton menggunakan standar ASTM C191 21[15], mengacu pada standar tersebut pengujian menggunakan alat *Vicat Test* dengan benda uji binder campuran semen dengan *fly ash* seberat 300gr per variasi 0%, 30%, 35%, 40% tiap sampelnya dengan FAB sebesar 0,25% dan interval pengujian setiap 15menit. Penurunan yang diperlukan untuk mencapai waktu pengikatan awal (*initial setting time*) adalah sebesar 25mm dan penurunan untuk waktu pengikatan akhir (*final setting time*) adalah 0mm atau sudah tidak ada lagi penurunan yang terjadi.

Pasta semen terbentuk melalui pencampuran bahan-bahan semen dengan air. Waktu yang diukur dari awal pencampuran hingga adonan mencapai tingkat kekerasan di mana adonan tidak bisa diproses lebih lanjut dikenal sebagai waktu pengikatan awal. Pada fase ini, pasta semen mulai menunjukkan pematangan awal. Setelah tahap ini, proses pengerasan berlanjut hingga pasta semen mencapai kepadatan maksimal, yang ditandai dengan peningkatan kekuatan hingga mencapai pengerasan akhir. Pada tahap pengerasan akhir ini, pasta semen terus memadat dan mengeras hingga mencapai tingkat kekuatan yang diinginkan..

2.3 Pengujian Flowability

Pengujian *flowability* menggunakan standar ASTM C 1611[16], pengujian dilakukan menggunakan kerucut abraham dengan papan alas minimal 100cm x 100cm, pengukuran dilakukan dua kali mengambil titik terjauh aliran beton segar, kemudian dihitung menggunakan rumus:

$$flowability = (d_1 - d_2) / 2$$

Dimana:

d_1 = diameter tumpahan beton maksimum (mm)

d_2 = diameter tumpahan beton maksimum tegak lurus d_1 (mm)

2.4 Pengujian Porositas

Pengujian porositas menggunakan standar ASTM C642 06[17], mengacu pada standar tersebut menggunakan 6 benda per variasi 0%, 30%, 35%, 40% tiap sampelnya, pengujian dilakukan untuk mencari masa kering oven dengan memasukan benda uji kedalam oven selama minimal 24jam dengan suhu kurang lebih $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, kemudian didiamkan disuhu ruangan $20^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C}$, setelah didapatkan hasil kering oven dilakukan perendaman benda uji selama kurang lebih 42jam, setelah perendaman benda uji dikeringkan permukaan lalu ditimbang untuk mendapatkan masa jenuh perendaman, kemudian benda uji direbus selama tidak kurang dari 5jam dengan suhu konstan, setelah perebusan benda uji di amkan disuhu ruangan hingga suhu normal tidak kurang dari 14jam kemudian timbang untuk mencari masa jenuh setelah perendaman, terakhir benda uji ditimbang dalam air untuk mencari masa benda uji. porositas dapat dihitung menggunakan rumus:

Tabel 2. Perhitungan rumus

Penyerapan setelah perendaman	$[(B - A)/A] \times 100$
Penyerapan setelah perendaman dan perebusan	$[(C - A)/A] \times 100$
Masa jenis curah kering	$[A/(C - D)] \times \rho = g_1$
Masa jenis curah setelah perendaman	$[B/(C - D)] \times \rho$
Masa jenis curah setelah perendaman dan perebusan	$[C/(C - D)] \times \rho$
Masa jenis	$[A/(A - D)] \times \rho = g_2$

Porositas	$(g_2 - g_1) / g_2 \times 100$
-----------	--------------------------------

Dimana:

- A = Masa benda uji kering oven (g)
- B = Masa benda uji kering permukaan setelah perendaman (g)
- C = Masa benda uji kering permukaan setelah perendaman dan perebusa (g)
- D = Masa benda uji dalam air setelah perendaman dan perebusan (g)
- g_1 = Masa kering benda uji (Mg/m^3)
- g_2 = Masa jenis benda uji (Mg/m^3)
- ρ = Masa jenis air ($1Mg/m^3$)

2.5 Pengujian Kuat Tekan

Untuk pengujian kuat tekan beton menggunakan ukuran silinder diameter 10cm x 20cm dengan masa curing beton selama 28hari, setelah masa curing beton dilakukan perendaman didalam larutan asam sulfat dengan kadar 2% selama 21 hari, setelah dilakukan perendaman beton didalam larutan asam sulfat selama 21 hari dilakukan pengujian kuat tekan beton dengan mengacu pada standar SNI 1974-2011[18].

$$F'_c = \frac{P}{A}$$

F'c = Kuat tekan beton (MPa)

P = Tekanan (N)

A = Luas area (mm^2)

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perencanaan *Mix Design*

Pengujian bahan campuran beton (*mix design*) dengan menguji berat jenis, penyerapan air, analisis saringan, modulus halus butir, pengujian kadar lumpur agregat kasar dan agregat halus, dan didapat data sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil pengujian bahan campuran beton

Uraian	Agregat kasar	Agaregat halus	Semen	<i>Fly ash</i>
Berat jenis SSD	2,65 kg/m^3	2,79 kg/m^3	3,15 kg/m^3	2,35 kg/m^3
Penyerapan kadar air	1,01 %	3,1 %		
Modulus halus butir	4,96	2,52		
Pengujian kadar lumpur	0,03%	7,1%		

Perencanaan campuran beton merupakan penentuan jumlah komposisi material penyusun beton diantaranya penentuan jumlah agregat halus, agregat kasar, semen, air, dan bahan tambahan lainnya, perencanaan campuran beton mengikuti standar EFNARC (*The European Federation of National Associations Respresenting for Concrete*) tahun 2005, untuk beton SCC bisa dilihat sebagai berikut:

Tabel 4. Standar EFNARC

Bahan	Kadar Terhadap Berat (kg/m^3)	Kadar Terhadap Volume (kg/m^3)
-------	-----------------------------------	------------------------------------

Binder	380-600	-
Air	150-210	150-230
Agregat Kadar	750-1000	270-360
Agregat Halus	Penggunaan agregat halus 45%-55% dari berat agregat	
FAS	0,30-0,55	0,85-1,10

Setelah menentukan acuan dalam campuran mix design beton SCC maka dapat ditentukan kebutuhan material yang digunakan untuk beton SCC menggunakan substitusi *fly ash* 0%, 30%, 35%,40% dengan benda uji silinder diameter 10cm x 20cm kebutuhan benda uji sebanyak 9 buah per variasi, dapat dilihat dari tabel berikut:

Tabel 5. Perhitungan kebutuhan bahan

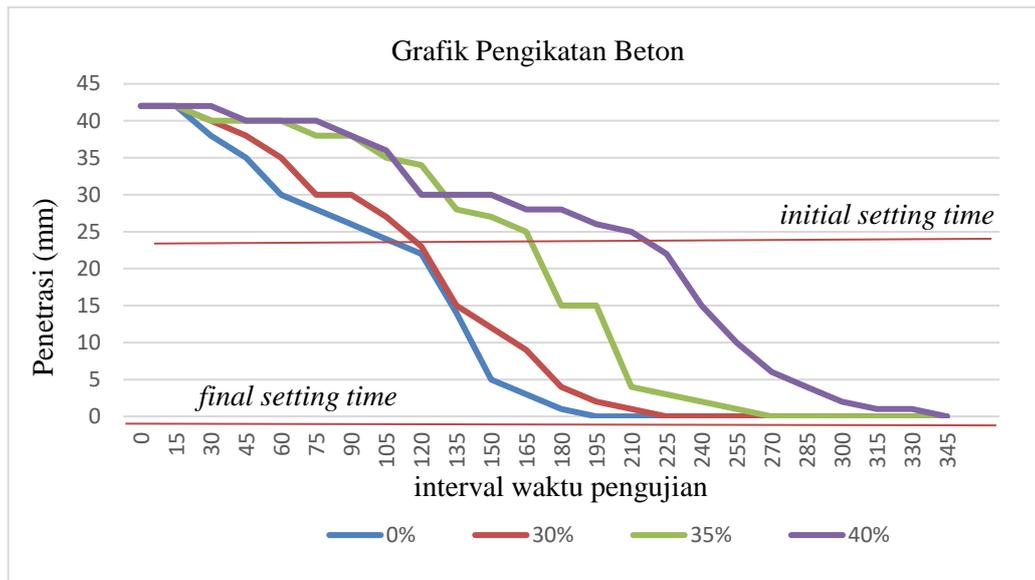
Variasi fly ash	Fly ash Kg	Semen Kg	Agregat kasar Kg	Agregat halus kg	Air L	Superplastieze r Kg	Accelerator Kg
0%	0	9,75	13,33	14,04	2,92	0,097	0,078
30%	2,92	6,82	12,92	13,60	2,92	0,683	0,055
35%	3,41	6,33	12,85	13,52	2,92	0,063	0,051
40%	3,90	5,85	12,78	13,45	2,92	0,058	0,047

3.2 Hasil pengujian waktu pengikatan beton (*Vicat Test*)

Pengujian waktu ikat beton dengan menggunakan alat *Vicat Test* dengan binder sebesar 300gr dan FAB 0,25% bervariasi diperoleh hasil sebagai berikut:

Tabel 6. Hasil pengujian waktu ikat

Kadar fly ash	Initial setting time (menit)	Final setting time (menit)	Kenaikan terhadap kadar 0 (%)	
			Initial	Final
0	105	195	0	0
30%	135	240	29	23
35%	180	300	71	54
40%	210	345	100	77



Gambar 1. Garfik waktu pengikatan beton



Gambar 2. Penguujian waktu ikat

Dari hasil pengujian yang disajikan tabel diatas didapatkan bahwa semakin banyak substitusi *fly ash* yang digunakan dalam campuran beton maka akan meningkatkan waktu ikat beton itu sendiri, hasil yang didapatkan hasil sebesar 29% untuk variasi *fly ash* 30%, sebesar 71% untuk variasi *fly ash* 35%, dan sebesar 100% untuk variasi *fly ash* 40% dibandingkan dengan beton SCC normal tanpa substitusi *fly ash* untuk pengujian waktu ikat awal (*initial setting time*) dan didapatkan hasil sebesar 23% untuk variasi *fly ash* 30%, sebesar 54% untuk variasi *fly ash* 35%, dan sebesar 77% untuk variasi *fly ash* 40% dibandingkan dengan beton SCC normal tanpa substitusi *fly ash* untuk pengujian waktu ikat akhir (*final setting time*). Berdasarkan pengujian bahwa peningkatan kadar *fly ash* dalam campuran beton memperpanjang waktu pengikatan merupakan aspek penting dalam desain dan pelaksanaan proyek konstruksi. *Fly ash* memperlambat proses hidrasi semen, yang secara alami menyebabkan perpanjangan waktu ikat beton, baik pada tahap awal (*initial setting time*) maupun tahap akhir (*final setting time*). Memahami dampak *fly ash* terhadap waktu pengikatan adalah kunci untuk perencanaan dan manajemen proyek konstruksi yang lebih efektif.

Fly ash berfungsi sebagai bahan *pozzolan*, yang berarti ia bereaksi dengan kalsium hidroksida (Ca(OH)_2), suatu produk sampingan dari hidrasi semen, untuk membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang memperkuat beton. Namun, reaksi ini berlangsung lebih lambat dibandingkan dengan hidrasi semen murni, yang mengakibatkan perlambatan dalam proses pengikatan. Pada waktu pengikatan awal, *fly ash* memberikan waktu tambahan untuk penyesuaian dan penempatan beton sebelum mulai mengeras.

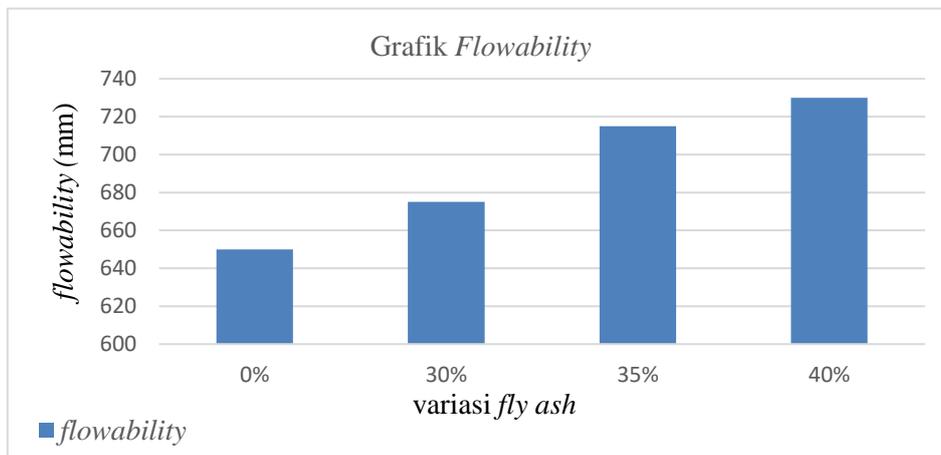
Sementara itu, pada waktu pengikatan akhir, *fly ash* memperpanjang periode pengerasan penuh, yang sering kali berkontribusi pada peningkatan ketahanan jangka panjang beton.

3.3 Hasil pengujian *flowability*

Pengujian *flowability* dilakukan setelah beton segar selesai dibuat dengan menggunakan beton segar dalam kerucut abrams tanpa pemadatan, pengukuran dilakukan 2 kali dengan mengambil sebaran maksimum, pengujian *flowability* menghasilkan data sebagai berikut:

Tabel 7. Hasil pengujian *flowability*

Kadar <i>fly ash</i>	Diameter 1 (mm)	Diameter 2 (mm)	Flowability (mm)	Kenaikan terhadap kadar 0 (%)
0	640	660	650	0
30%	690	660	675	4
35%	720	710	715	10
40%	740	720	730	12



Gambar 3. Hasil pengujian *flowability*



Gambar 4. Pengujian *flowability*

Dari hasil pengujian *flowability* yang disajikan tabel diatas dengan substitusi *fly ash* sebesar 0%, 30%, 35%, 40% terlihat bahwa ada peningkatan *flowability*, dari data yang didapatkan sebesar 4% untuk variasi *fly ash* 30%, sebesar 10% untuk variasi *fly ash* 35%, dan sebesar 12% untuk variasi *fly ash* 40% dibandingkan dengan beton SCC normal tanpa substitusi *fly ash*. Sesuai dengan karakteristik beton SCC yang merupakan beton yang dapat mengalir sendiri tanpa harus adanya pemadatan manual, maka meningkatnya *flowability* dalam campuran beton dengan substitusi *fly ash* merupakan dampak yang baik bagi beton SCC. Untuk

flowability dengan kadar 0% terlihat seperti beton SCC konvensional biasanya, namun, setelah ditambahkan substitusi *fly ash* dengan kadar 30%, 35%, dan 40% terjadi peningkatan yang konsisten sejalan dengan bertambahnya substitusi *fly ash* yang digunakan dalam campuran beton SCC.

Hal tersebut bisa terjadi dikarenakan *fly ash* merupakan hasil sampingan dari pembakaran batubara, memiliki partikel yang sangat halus dan berbentuk bulat, berbeda dari partikel semen yang umumnya lebih kasar dan tidak teratur. Karena sifat fisik ini, *fly ash* mengurangi gesekan internal antar partikel dalam campuran beton, memungkinkan beton mengalir lebih lancar. Partikel *fly ash* yang halus juga berperan dalam mengisi celah-celah kecil di antara agregat dan partikel semen, sehingga menciptakan campuran yang lebih merata dan mudah mengalir. Selain itu, *fly ash* cenderung menurunkan *viskositas* campuran beton, meningkatkan *fluiditas* tanpa perlu menambah air berlebih, yang bisa mengurangi kekuatan akhir beton.

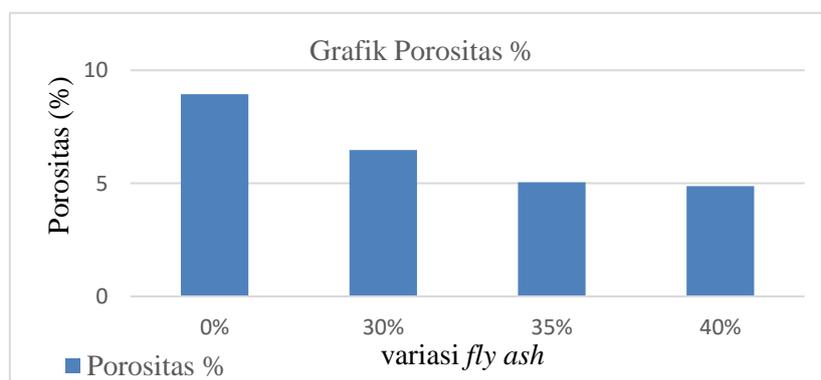
Dalam praktik lapangan, peningkatan *flowability* akibat penambahan *fly ash* memungkinkan beton untuk dituangkan dengan lebih cepat dan efisien. Hal ini sangat bermanfaat untuk proyek konstruksi besar di mana waktu sangat penting. Sebagai contoh, dalam pembangunan gedung bertingkat tinggi, jembatan, atau struktur kompleks lainnya, *flowability* yang tinggi memastikan beton dapat mengisi bekisting dengan baik dan membungkus tulangan secara menyeluruh tanpa memerlukan pemadatan tambahan. Ini tidak hanya menghemat waktu dan tenaga kerja, tetapi juga mengurangi risiko segregasi material dan *honeycombing* (kekosongan dalam beton) yang dapat melemahkan kekuatan struktur. Selain itu, *flowability* yang baik mengurangi beban pada pekerja, karena beton menjadi lebih mudah diatur dan diproses, sehingga mengurangi kemungkinan kesalahan dan meningkatkan kualitas akhir konstruksi.

3.4 Hasil pengujian porositas beton

Pengujian dilakukan menggunakan benda uji silinder dengan volume minimal 350cm³ atau berat benda uji tidak kurang dari 800gr dengan melakukan tahapan pengujian mengacu pada ASTM C642-06[15], menghasilkan data sebagai berikut:

Tabel 8. Hasil pengujian porositas

Kadar <i>fly ash</i>	Penyerapan air (%)	Porositas (%)	Penurunan terhadap kadar 0 (%)	
			Penyerapan	Porositas
0	0,045	8,95	0	0
30%	0,030	6,47	33	28
35%	0,025	5,95	44	34
40%	0,023	5,44	49	39



Gambar 5. Hasil pengujian porositas

Dari hasil pengujian porositas yang disajikan dalam tabel di atas terlihat bahwa penambahan substitusi *fly ash* mengakibatkan menurunnya angka porositas beton sebesar 28% untuk variasi *fly ash* 30%, sebesar 34% untuk variasi *fly ash* 35%, dan sebesar 39% untuk variasi *fly ash* 40% dibandingkan dengan beton SCC normal tanpa substitusi *fly ash*, menurunnya porositas bisa diartikan beton menjadi semakin padat karna

volume pori menjadi semakin kecil, hal ini bisa disebabkan karena *fly ash* yang merupakan hasil sampingan dari pembakaran batubara, terdiri dari partikel-partikel yang sangat halus dan berbentuk bulat, berbeda dengan partikel semen yang biasanya lebih kasar dan tidak beraturan. Karena sifat fisik *fly ash* ini, gesekan internal antara partikel dalam campuran beton berkurang, sehingga beton dapat mengalir dengan lebih mudah merupakan partikel halus yang berbentuk bulat dan meningkatkan *workability* beton SCC,

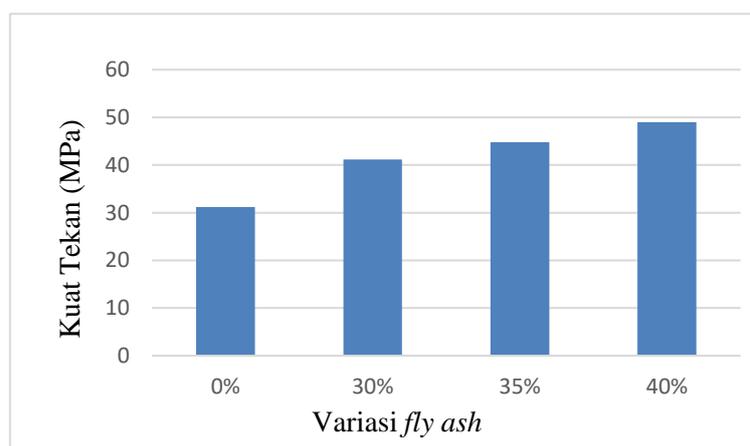
Secara ilmiah, porositas beton mempengaruhi sejauh mana beton dapat menyerap air dan bahan kimia lainnya. Semakin tinggi porositas, semakin mudah air dan zat berbahaya dapat menembus dan mencapai tulangan baja dalam beton, yang dapat menyebabkan korosi dan kerusakan struktural. *Fly ash*, dengan partikel-partikelnya yang halus, tidak hanya mengisi celah antar partikel, tetapi juga berperan dalam pembentukan produk hidrasi sekunder, seperti C-S-H, yang meningkatkan kekuatan dan kepadatan beton. Selain itu, pengurangan porositas mengurangi jalur kapiler dalam beton, yang menghambat transportasi ion berbahaya seperti klorida atau sulfat, sehingga meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan kimia.

3.5 Hasil pengujian kuat tekan beton

Hasil pengujian kuat tekan beton dilakukan setelah curing beton selama 28 hari dan setelah perendaman dalam air yang mengandung asam sulfat sebesar 2% selama 21 hari, setelah dilakukan pengujian kuat tekan menghasilkan data sebagai berikut:

Tabel 9. Hasil pengujian kuat tekan beton

Kadar <i>fly ash</i>	Sampel 1 (MPa)	Sampel 2 (MPa)	Sampel 3 (MPa)	Rata-rata (MPa)	Kenaikan terhadap kadar 0 (%)
0	24,84	38,21	30,57	31,21	0
30%	43,21	39,49	40,76	41,18	32
35%	51,59	40,76	42,38	44,79	44
40%	40,12	59,23	48,40	49,25	58



Gambar 6. Hasil pengujian kuat tekan beton



(a)

(b)

Gambar 7. Gambar perbandingan benda uji, (a) sebelum perendaman asam sulfat (b) setelah perendaman asam sulfat



Gambar 8. Gambar setelah uji tekan beton

Dari hasil pengujian kuat tekan beton yang disajikan tabel diatas menunjukkan peningkatan kekuatan dan ketahanan seiring dengan bertambahnya kadar *fly ash*, dari hasil pengujian didapatkan peningkatan kekuatan beton SCC setelah perendaman asam sulfat sebesar 32% untuk variasi *fly ash* 30%, sebesar 44% untuk variasi *fly ash* 35%, dan sebesar 58% untuk variasi *fly ash* 40% dibandingkan dengan beton SCC normal tanpa substitusi *fly ash*, hal ini dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme ilmiah. *Fly ash*, sebagai bahan *pozzolan*, secara signifikan meningkatkan pembentukan kalsium silikat hidrat (C-S-H) melalui reaksi *pozzolanik*. Produk hidrasi ini berperan utama dalam memperkuat struktur mikro beton dan mengurangi porositasnya. Dengan penurunan porositas, penetrasi asam sulfat ke dalam beton menjadi lebih terbatas, sehingga reaksi merusak seperti pembentukan *gypsum* dan *ettringite* dapat diminimalkan. Selain itu, penggunaan *fly ash* juga mengurangi jumlah kalsium hidroksida yang tersedia, yang biasanya rentan terhadap serangan asam. Dengan berkurangnya kalsium hidroksida, beton menjadi lebih tahan terhadap degradasi kimia, yang terlihat dari peningkatan kuat tekan pada kadar *fly ash* yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, *fly ash* tidak hanya memperkuat beton tetapi juga meningkatkan ketahanan jangka panjangnya terhadap lingkungan yang agresif, menjadikan material ini sangat efektif dalam praktik konstruksi yang memerlukan durabilitas tinggi di bawah kondisi ekstrem.

Peningkatan kuat tekan yang diamati pada variasi kadar *fly ash* dari 0% hingga 40% menunjukkan bahwa terdapat titik optimal di mana *fly ash* mampu memberikan manfaat maksimal dalam hal kekuatan dan durabilitas, tanpa mengorbankan aspek lain dari performa beton. Dalam praktik konstruksi, ini berarti penggunaan *fly ash* dalam proporsi yang tepat dapat menghasilkan beton yang tidak hanya kuat tetapi juga lebih tahan lama, terutama dalam struktur yang berisiko tinggi terpapar zat kimia agresif seperti dalam

lingkungan industri atau wilayah pesisir. Temuan ini memperkuat pentingnya pengujian dan desain campuran yang hati-hati untuk memanfaatkan potensi penuh *fly ash* sebagai bahan pengganti semen dalam beton berkinerja tinggi.

4. KESIMPULAN

4.1 Waktu Ikat

Hasil penelitian ini adalah penggunaan substitusi *fly ash* dengan kadar tertentu (30%, 35%, 40%) ternyata dapat memperpanjang waktu ikat (*initial setting time* dan *final setting time*), dari hasil yang didapatkan peningkatan waktu ikat tertinggi terjadi di variasi substitusi *fly ash* 40% sebesar 100% untuk waktu ikat awal (*initial setting time*) dan sebesar 77% untuk waktu ikat akhir (*final setting time*) dibandingkan dengan beton normal tanpa substitusi *fly ash*, hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan *fly ash* yang digunakan akan membuat waktu pengerasan beton menjadi semakin lama.

4.2 Flowability

Dari hasil penelitian *flowability* menunjukkan peningkatan terus terjadi di setiap variasi (30%, 35%, 40%) seiring dengan bertambahnya jumlah *fly ash* yang digunakan dibandingkan beton SCC normal tanpa *fly ash*, peningkatan tertinggi terjadi di variasi substitusi *fly ash* kadar 40% dengan hasil 12%, hal sesuai dengan karakteristik beton SCC yang dapat mengalir sendiri tanpa adanya pemadatan menjadikan *fly ash* sebagai bahan tambahan yang baik untuk meningkatkan efisiensi dalam pengerjaan beton.

4.3 Porositas

Penelitian juga menunjukkan terjadinya penurunan porositas beton, penurunan tertinggi terjadi di variasi substitusi *fly ash* 40% dengan hasil 39% dibandingkan dengan beton SCC normal tanpa substitusi *fly ash*. Dikarenakan sifat *fly ash* sebagai *pozzolan* yang mengandung silika dengan butiran yang sangat halus menjadikan menurunkan angka porositas beton sehingga menambah kepadatan beton SCC.

4.4 Kuat tekan

Dampak pada menurunnya porositas pada beton yang menjadikan pori beton semakin kecil dan padat berdampak pada kuat tekan dan ketahanan beton SCC itu sendiri. Dari hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan kekuatan beton SCC terhadap resistensi asam sulfat, hasil tertinggi yang didapatkan untuk kuat tekan beton SCC dengan resistensi asam sulfat adalah 49,25 MPa atau terjadi peningkatan sebesar 58% dari beton SCC normal tanpa adanya substitusi *fly ash* yang mendapatkan hasil 31,21 MPa. Hasil tersebut membuktikan bahwa semakin tinggi kandungan *fly ash* dalam campuran beton SCC akan mempengaruhi kuat tekan dan ketahanan terhadap asam sulfat

5. SARAN

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penelitian ini, Saran untuk penelitian selanjutnya mungkin penggantian *fly ash* pada tingkat yang lebih tinggi dari 40%. Untuk dapat memberikan wawasan tentang batas maksimum penggabungan *fly ash* dan dampaknya pada waktu pengikatan, *flowability*, porositas, dan kekuatan tekan. Disarankan untuk melakukan percobaan dengan periode perendaman yang lebih lama dalam larutan asam sulfat. Ini akan memungkinkan penelitian untuk menilai daya tahan jangka panjang dan ketahanan beton SCC yang mengandung *fly ash* di bawah kondisi lingkungan yang agresif. Studi semacam itu dapat memberikan data tentang umur panjang struktur beton yang terpapar bahan kimia keras. Selain waktu perendaman yang lebih lama, pengujian dengan konsentrasi asam sulfat yang lebih tinggi dapat menghasilkan informasi mengenai kinerja *fly ash* dalam beton, ini akan membantu dalam memahami bagaimana kondisi lingkungan yang berbeda mempengaruhi beton SCC dari waktu ke waktu. Melakukan studi lapangan pada proyek konstruksi skala besar menggunakan SCC dengan *fly ash* dapat memberikan wawasan praktis tentang kinerjanya dalam aplikasi dunia nyata, Mengamati bagaimana campuran ini berperilaku dalam berbagai kondisi dapat membantu memvalidasi temuan laboratorium dan menginformasikan praktik terbaik di industri. Peneliti juga harus mempertimbangkan untuk mengeksplorasi penggunaan bahan limbah industri lainnya dalam hubungannya dengan *fly ash*. Hal ini dapat mengarah pada pengembangan campuran beton inovatif yang lebih meningkatkan kinerja sambil

mempromosikan keberlanjutan dalam praktik konstruksi, Dengan mengatasi saran ini, penelitian masa depan dapat berkontribusi pada pemahaman yang lebih dalam tentang peran *fly ash* dalam meningkatkan sifat beton dan potensinya untuk praktik konstruksi berkelanjutan serta membuat beton ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. K. Hadi, S. Supardi, M. Maruddin, A. A. A. Yusuf, and R. H. Samsuddin, "Pengaruh Metode Self Compacting Concrete (Scc) Terhadap Sifat Mekanis Beton," *PENA Tek. J. Ilm. Ilmu-Ilmu Tek.*, vol. 6, no. 1, p. 32, 2021, doi: 10.51557/pt_jiit.v6i1.642.
- [2] 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, 2023, doi: 10.52447/jkts.v7i2.6852.
- [3] Y. Sharifi, I. Afshoon, M. Nematollahzade, M. Ghasemi, and M. A. Momeni, "Effect of copper slag on the resistance characteristics of SCC exposed to the acidic environment," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 597–609, 2020, doi: 10.1007/s42107-019-00218-x.
- [4] E. Thwe, D. Khatiwada, and A. Gasparatos, "Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar," *Clean. Environ. Syst.*, vol. 2, p. 100007, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CESYS.2020.100007.
- [5] "PP Nomor 101 Tahun 2014," 2014, pp. 1–2.
- [6] A. P. Abriantoro and S. E. Susilowati, "Eksperimental Substitusi Serbuk Kaca Pada Binder Untuk Meningkatkan Kuat Tekan Beton Self-Compacting Concrete (SCC) Pada Umur 1 Hari," *J. Rekayasa Infrastruktur*, vol. 9, no. 1, pp. 47–54, Oct. 2023, doi: 10.31943/JRI.V9I1.218.
- [7] R. A. Wijaya, S. Wijayanti, and Y. Astuti, "Fly Ash Limbah Pembakaran Batubara sebagai Zat Mineral Tambahan (Additive) untuk Perbaikan Kualitas dan Kuat Tekan Semen," *Media Komun. Tek. Sipil*, vol. 27, no. 1, pp. 127–134, 2021.
- [8] I. Aryono., A. S. Budi, and H. A. Saifullah, "Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang HvfA Memadat Sendiri Dengan Kadar Fly Ash 50% Terhadap Beton Normal," *Matriks Tek. Sipil*, vol. 8, no. 1, pp. 9–14, 2020, doi: 10.20961/mateksi.v8i1.41513.
- [9] M. Suranto, D. Darupratomo, and H. Saputro, "Pengembangan Teknologi Bahan Mendukung Pembangunan Berkelanjutan Bidang Teknik Sipil (High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete/HVFA-SCC)," *J. Sipil Terap.*, vol. 2, no. 1, 2024, [Online]. Available: <http://ftuncen.com/index.php/jusit/article/view/382%0Ahttp://ftuncen.com/index.php/jusit/article/download/382/327>
- [10] M. Setiawati, "Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton," *Semin. Nas. Sains dan Teknol. 2018*, pp. 1–8, 2018.
- [11] V. B. E. Saputro, "Kajian Kuat Lekat pada Beton High Volume Fly Ash (HVFA) dengan Kadar Fly Ash 50%, 60%, dan 70% dari Berat Binder," *Matriks Tek. Sipil*, vol. 9, no. 3, p. 186, 2021, doi: 10.20961/mateksi.v9i3.54544.
- [12] R. A. Ikomudin, B. Herbudiman, and R. R. Irawan, "Ketahanan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash terhadap Sulfat dan Klorida," *Jur. Tek. Sipil Itenas*, vol. Vol.2, no. No.4, pp. 33–43, 2016.
- [13] C. Aggregates, "ASTM C136 Analysis of Fine and Coarse Aggregates," no. January, pp. 1–2, 2019, doi: 10.1520/C0136.

- [14] “Astm C70 | PDF | Volume | Nature.” Accessed: Aug. 07, 2024. [Online]. Available: <https://id.scribd.com/doc/187742721/ASTM-C70>
- [15] ASTM-C191-2, “Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle,” vol. i, pp. 1–4, 2015, doi: 10.1520/C0191-21.2.
- [16] ASTM C 1611, “ASTM C1611-09 Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete,” *Annu. B. ASTM Stand. Vol. 04.02*, vol. i, pp. 1–6, 2009.
- [17] A. C. 642, “Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete C642-97,” *ASTM Int.*, no. March, pp. 1–3, 1997.
- [18] SNI-1974, “Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder,SNI 1974-2011,” *Badan Stand. Nas. Indones.*, p. 20, 2011.