JURNAL REKAYASA SIPIL
Vol. 20 No. 3, Desember 2024
Diterbitkan oleh:
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Andalas (Unand)
ISSN (Print): 1858-2133
ISSN (Online): 2477-3484
http://jrs.ft.unand.ac.id

MIX DESIGN DAN KARAKTERISTIK TEKNIS SCC MENGGUNAKAN *HIGH VOLUME FLY ASH* SEBAGAI PENGGANTI SEMEN

MARGERITHA AGUSTINA MORIB[1]*, NINIK ARIYANI[1], ANUGRAH JAYA TELAUMBANUA[1], YOSUA EMMANUEL ZEBUA[1]

1 Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Immanuel Yogyakarta
Jl. Solo KM. 11,1, Purwomartani, Kalasan, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55571
**Corresponding Author : margerithaagustina@ukrimuniversity.ac.id*

Naskah diterima: 25 September 2024. Disetujui: 18 Desember 2024. Diterbitkan: 30 Desember 2024

ABSTRAK

Self Compacted Concrete (SCC) mudah mengalir, mengisi ruang cetakan dan melewati tulangan tanpa pemadatan tanpa segregasi. Untuk mengalirkan agregat kasar diperlukan campuran mortar yang sangat homogen dan mudah mengalir. Penggunaan *fly ash* dipilih karena butirannya lebih halus dari semen untuk meningkatkan rentang gradasi butiran sehingga beton semakin padat. *Mix design* SCC pada penelitian ini dilakukan secara bertahap yaitu merancang campuran pasta, merancang mortar dan merancang SCC. *Water powder ratio* (w/p=0,35), menggunakan pasir Kali Kuning Yogyakarta bergradasi agak kasar. *Mix design* dihitung untuk 1 m^3 SCC.. Komposisi *fly ash* adalah 0%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%. Komposisi SP direncanakan menggunakan PC-FA40 sebagai rata-rata substitusi partial semen dengan *fly ash* dengan variasi 1,2%, 1,4%, 1.6%, 1,8%, 2%. Pengujian *flow mortar* menggunakan *electric flow table* dan kuat tekan umur 3 dan 28 hari diperoleh dari uji kubus mortar berukuran 5cm x 5 cm x 5cm. Karakteristik reologi SCC diukur menggunakan *slump flow, V-funnel, L-box* dan *segregation resistance set* sesuai EFNARC 2005. Karakteristik beton keras meliputi kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas diperoleh berdasarkan hasil uji tekan benda uji silinder pada umur 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar optimum *superplasticizer* pada mortar adalah 1,8%, menghasilkan *flow mortar* sebesar 252,73 mm dan kuat tekan umur 28 hari sebesar 47,09 MPa. Kadar optimum *fly ash* pada mortar adalah 50% dari semen, menghasilkan *flow mortar* sebesar 300,35 mm dan kuat tekan umur 28 hari sebesar 49,77 MPa. Pada mortar umur 3 hari pengaruh semen terhadap kuat tekan mortar lebih dominan sedangkan pada umur 28 hari pengaruh *fly ash* yang lebih dominan. Reaksi *fly ash* lebih lambat dari pada semen. Tidak semua mix design yang dirancang memenuhi kriteria SCC terutama kemampuan beton melewati tulangan. *Mix design* PC-FA30 menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 34,88 Mpa. Kuat tarik belah tertinggi sebesar 8,69 Mpa pada PC-FA50. Modulus elastisitas tertinggi pada PC-FA0 sebesar 17893,94 Mpa. Penambahan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen meningkatkan kuat tekan, tetapi modulus elastis terus mengalami penurunan.

Kata kunci : *Mix design, reologi beton segar, kuat tekan, kuat tarik belah, modulus elastisitas*

DOI : https://doi.org/10.25077/jrs.20.3.167-181.2024
Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved

1. PENDAHULUAN

Self Compacting Concrete (SCC) dapat didefinisikan sebagai suatu jenis beton yang mudah dituang, mengalir dan menjadi padat dengan memanfaatkan berat sendiri, tanpa memerlukan proses pemadatan dengan getaran atau metode lainnya. SCC bersifat kohesif dan dapat dikerjakan tanpa terjadi segregasi dan bleeding, selain itu juga harus tetap homogen tanpa adanya blocking (Widodo, 2004). Tujuan penggunaan SCC adalah untuk mendapatkan beton dengan performa tinggi. Beton dalam keadaan segar bisa memadat sendiri tanpa penggetaran. Pada umur dini, beton tidak mudah retak akibat penyusutan, dan ketika keras, beton memiliki kuat tekan serta keawetan yang tinggi. Karakteristik beton segar SCC adalah memiliki kemampuan mengisi celah di antara tulangan (filling ability), kemampuan melewati tulangan (passing ability) dengan tetap mempertahankan kekentalan (viscocity) dan memiliki ketahanan terhadap segregasi (segregation resistance). Untuk mencapai sifat tersebut diperlukan mix design yang tepat dan bahan tambah kimia pengurang air yaitu superplasticizer serta fraksi agregat halus yang lebih banyak dibandingkan beton konvensional (Amalia & Riyadi, 2019) .

Konsep bangunan hijau (green building) mengharuskan penggunaan material konstruksi yang ramah lingkungan. Penggunaan semen pada campuran SCC sangat besar karena jumlah pasta semen mempengaruhi kemampuan alir agregat halus dan mortar mempengaruhi kemampuan alir agregat kasar. Penggunaan fly ash untuk subtitusi semen merupakan cara untuk penerapan green building . Fly ash adalah sisa hasil pembakaran batu bara dari tungku pembangkit tenaga uap yang terbawa gas buangan cerobong asap yang kemudian ditangkap sebelum terbawa keluar cerobong (Nuraini et al., 2019). Penggunaan fly ash pada beton hanya digunakan bersama dengan Ordinary Portland Cement (semen tipe I). Hal itu didasari pada sifat material yang memiliki kemiripan dengan sifat semen. Secara fisik, fly ash memiliki kemiripan dengan semen dalam hal kehalusan butir-butirnya. Sifat kimia yang dimiliki oleh fly ash berupa silika dan alumina dengan persentase mencapai 80% juga mirip dengan semen. Adanya kemiripan sifat-sifat ini menjadikan fly ash sebagai material pengganti untuk mengurangi jumlah semen pada beton mutu tinggi (Setiawati, 2018). Penggunaan fly ash sebagai pengganti semen dibatasi pada abu terbang kelas F dengan penggunaan maksimum 40% (Wenno et al., 2014). Penggunaan fly ash dalam jumlah besar berpengaruh terhadap kuat tekan pada umur awal dan akhir mortar dan beton. (Morib, Telaumbanua, et al., 2024) meneliti mortar sebagai media alir SCC dengan hasil uji komposisi 50% fly ash sebagai pengganti semen memberikan hasil terbaik pada aliran mortar dan kuat tekan. Semakin besar komposisi fly ash mengakibatkan peningkatan kekuatan beton lebih lambat di umur awal, tetapi memberikan hasil akhir yang lebih baik. Pada umur 3 hari penggantian semen dengan fly ash mengakibatkan penurunan kuat tekan karena pozzolan dalam fly ash belum bereaksi sempurna, namun pengaruh fly ash meningkat drastis pada umur 28 hari.

Gradasi dan modulus halus butir agregat yang digunakan dalam campuran mortar dan beton SCC berpengaruh terhadap kuat tekan yang dihasilkan. Pasir gradasi II (agak kasar) memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dari pada pasir gradasi IV (halus) namun aliran dan kekentalan campuran mortar menggunakan pasir gradasi IV lebih baik dari pada pasir gradasi II (Ulitua & Gole, 2023). Untuk meningkatkan kerapatan agregat (particle packing) diperlukan komposisi agregat halus dan agregat kasar yang tepat sehingga volume rongga antar agregat berkurang dan secara keseluruhan mengurangi jumlah pasta. Semakin besar komposisi pasir dalam agregat campuran kinerja beton segar SCC meningkat (Morib et al., 2024).

Perkembangan penelitian mengenai SCC diawali dengan penelitian Okamura dan Ouchi, 1995. Komposisi material yang diperlukan SCC dan beton konvensional berbeda. Komposisi mineral halus (powder) pada SCC lebih banyak dibandingkan komposisi semen pada beton konvensional. Powder dapat berupa semen ataupun binder (bahan pengikat yang terdiri dari semen dan filler). Komposisi agregat halus hampir sama antara SCC dan beton konvensional,

sedangkan komposisi kerikil SCC lebih sedikit. Proporsi agregat kasar sebesar 50% dan proporsi agregat halus sebesar 60% dari agregat campuran disarankan untuk menghasilkan deformasi geser beton kecil. Campuran SCC diperoleh dengan cara menggunakan agregat lebih sedikit, water powder ratio (w/p) kecil serta menggunakan superplasticizer (SP) (Okamura & Ouchi, 2003).

Mix design adalah proses menentukan komposisi campuran adukan berdasarkan data-data dari bahan dasar beton. Dari komposisi campuran ini diharapkan akan dihasilkan beton yang memenuhi sifat-sifat minimum kekuatan, kekentalan, keawetan dan ekonomis. Prosedur perancangan SCC tidak ditetapkan secara pasti karena banyak parameter yang terlibat dalam prosesnya. Okamura dan Ozawa, 1995 membuka pintu penelitian di bidang ini dengan memberikan panduan perancangan campuran, metode pengujian serta kriteria penerimaan SCC. (ENFARC, 2005) mengembangkan petunjuk perancangan, pengujian dan penerimaan beton SCC sementara Indonesia belum memiliki panduan resmi berupa SNI/pedoman/manual khusus untuk perancangan SCC sehingga metode perancangan SCC menggunakan material lokal sangat terbuka bagi penelitian. Prosedur perancangan dapat dikembangkan dengan tetap berfokus pada hasil sesuai kriteria penerimaan beton segar SCC. Beberapa peneliti menyederhanakan rancangan SCC dengan membagi komponen SCC menjadi mortar dan agregat kasar. Perancangan SCC diawali dengan menentukan campuran flow mortar kemudian menambahkan agregat kasar dengan ukuran tertentu ke dalam flow mortar (Purwowidiatmoko, A. M., 2017). Metode ini menghasilkan SCC dengan kemampuan alir dan kuat tekan tinggi. Kemampuan alir ditentukan oleh besarnya Koefisien Absolut Mortar (KAM) terhadap volume rongga agregat kasar. KAM yang semakin besar menghasilkan volume pasta dan pasir dalam campuran SCC semakin banyak sedangkan agregat kasar semakin sedikit sehingga kemampuan mengalir, mengisi ruangan, melewati rintangan dan ketahanan terhadap segregasi semakin baik. KAM optimum diperoleh sebesar 1,8 kali volume rongga angregat kasar. Beton yang memenuhi syarat SCC pada fase beton segar berkorelasi dengan hasil kuat tekan yang tinggi. Kuat tekan beton umur 3 hari mencapai 71,14% dari kuat tekan umur 28 hari pada KAM-1,4 sedangkan untuk KAM-1,6 dan KAM-1,8 kuat tekan beton umur 3 hari mencapai 58,85% dan 54,74%. Semakin besar volume mortar dalam campuran SCC menyebabkan laju pengerasan pada umur awal beton lebih lambat namun memberikan hasil akhir kuat tekan lebih tinggi (Morib, Zai, et al., 2024).

Perkembangan penelitian mengenai SCC diawali dengan penelitian Okamura dan Ouchi, 1995. Komposisi material yang diperlukan SCC dan beton konvensional berbeda. Komposisi mineral halus (*powder*) pada SCC lebih banyak dibandingkan komposisi semen pada beton konvensional. *Powder* dapat berupa semen ataupun *binder* (bahan pengikat yang terdiri dari semen dan *filler*). Komposisi agregat halus hampir sama antara SCC dan beton konvensional, sedangkan komposisi kerikil SCC lebih sedikit. Proporsi agregat kasar sebesar 50% dan proporsi agregat halus sebesar 60% dari agregat campuran disarankan untuk menghasilkan deformasi geser beton kecil. Campuran SCC diperoleh dengan cara menggunakan agregat lebih sedikit, *water powder ratio* (w/p) kecil serta menggunakan *superplasticizer* (SP) (Okamura & Ouchi, 2003).

Mix design adalah proses menentukan komposisi campuran adukan berdasarkan data-data dari bahan dasar beton. Dari komposisi campuran ini diharapkan akan dihasilkan beton yang memenuhi sifat-sifat minimum kekuatan, kekentalan, keawetan dan ekonomis. Prosedur perancangan SCC tidak ditetapkan secara pasti karena banyak parameter yang terlibat dalam prosesnya. Okamura dan Ozawa, 1995 membuka pintu penelitian di bidang ini dengan memberikan panduan perancangan campuran, metode pengujian serta kriteria penerimaan SCC. (ENFARC, 2005) mengembangkan petunjuk perancangan, pengujian dan penerimaan beton SCC sementara Indonesia belum memiliki panduan resmi berupa SNI/pedoman/manual khusus untuk perancangan SCC sehingga metode perancangan SCC menggunakan material

lokal sangat terbuka bagi penelitian. Prosedur perancangan dapat dikembangkan dengan tetap berfokus pada hasil sesuai kriteria penerimaan beton segar SCC. Beberapa peneliti menyederhanakan rancangan SCC dengan membagi komponen SCC menjadi mortar dan agregat kasar. Perancangan SCC diawali dengan menentukan campuran *flow mortar* kemudian menambahkan agregat kasar dengan ukuran tertentu ke dalam *flow mortar* (Purwowidiatmoko, A. M., 2017). Metode ini menghasilkan SCC dengan kemampuan alir dan kuat tekan tinggi. Kemampuan alir ditentukan oleh besarnya Koefisien Absolut Mortar (KAM) terhadap volume rongga agregat kasar. KAM yang semakin besar menghasilkan volume pasta dan pasir dalam campuran SCC semakin banyak sedangkan agregat kasar semakin sedikit sehingga kemampuan mengalir, mengisi ruangan, melewati rintangan dan ketahanan terhadap segregasi semakin baik. KAM optimum diperoleh sebesar 1,8 kali volume rongga angregat kasar. Beton yang memenuhi syarat SCC pada fase beton segar berkorelasi dengan hasil kuat tekan yang tinggi. Kuat tekan beton umur 3 hari mencapai 71,14% dari kuat tekan umur 28 hari pada KAM-1,4 sedangkan untuk KAM-1,6 dan KAM-1,8 kuat tekan beton umur 3 hari mencapai 58,85% dan 54,74%. Semakin besar volume mortar dalam campuran SCC menyebabkan laju pengerasan pada umur awal beton lebih lambat namun memberikan hasil akhir kuat tekan lebih tinggi (Morib, Zai, et al., 2024).

EFNARC 2005 memberikan panduan penyusunan *mix design* SCC untuk memenuhi semua persyaratan SCC pada kondisi segar.

1. Pasta dengan fluiditas dan viskositas yang memenuhi syarat diperoleh dengan pemilihan dan penyesuaian teliti terhadap komposisi semen dan bahan tambah. *Water powder ratio* kecil, penambahan SP serta *Viscosity Modifying Admixture* (VMA) untuk meningkatkan aliran dengan tetap mempertahankan viskositas perlu ditetapkan dengan tepat.
2. Temperatur dijaga tetap stabil agar tidak terjadi retak akibat susut yang besar. Kontrol terhadap jumlah semen Tipe I maupun Tipe II perlu diatur sehingga jumlah semen tidak terlalu besar dengan menggunakan sejumlah besar material pengganti (*cement replacement material*).
3. Pasta semen merupakan media alir agregat. Jumlah pasta cukup besar untuk membantu agregat mengalir. Volume pasta harus lebih besar dari volume rongga antar agregat sehingga seluruh partikel agregat terbungkus penuh dengan pasta dan terlumasi dengan baik. Proses ini meningkatkan *fluiditas* dan mengurangi gesekan antar partikel agregat yang berpotensi menghambat aliran.
4. Rasio agregat kasar terhadap agregat halus dikurangi sehingga partikel agregat kasar secara individu benar-benar terbungkus oleh mortar. Hal ini mengurangi saling tautan antar agregat dan meningkatkan *passing ability* saat beton mengalir melalui rintangan tulangan yang rapat.

Penelitian ini dirancang untuk mendapatkan *mix design* yang tepat untuk menghasilkan SCC dengan tingkat aliran dan karakteristik teknis tinggi menggunakan *high volume fly ash* sebagai pengganti semen. Pengaruh komposisi *fly ash* sebesar 0%, 30%, 35%, 40%, 45% dan 50% terhadap sifat beton segar yaitu kemampuan mengalir, mengisi ruang, melewati rintangan dan memadat sendiri juga karakteristik setelah beton mengeras yaitu kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastis yang dihasilkan diteliti.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Material dan Peralatan Penelitian

Material penyusun SCC yang digunakan pada penelitian ini adalah semen portland type 1, *fly ash* dari PLTU Paiton Jawa Timur, agregat halus dari Kali Kuning Yogyakarta, agregat kasar dari Clereng Kulon Progo, air dari Laboratorium Bahan Bangunan UKRIM dan *Deltamix SP Powder* dengan merek Deltacrete. Peralatan penelitian meliputi *electric flow table*, *compression*

testing machine, *compressometer*, *split tensile test set*, cetakan kubus mortar berukuran 5cm x 5cm x 5cm, cetakan silinder berukuran 15cm x 30cm dan alat uji reologi beton segar yaitu *v-funnel*, *L-Box*, peralatan uji *slump flow* dan *sieve segregation*.

2.2. *Mix Design* SCC

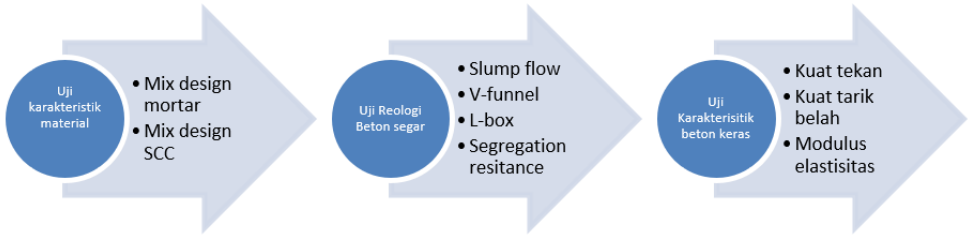
Perancangan *mix design* SCC dilakukan secara bertahap. Tahap awal adalah menentukan faktor granular agregat apakah termasuk bergradasi baik dan merancang agregat campuran untuk menghasilkan kepadatan (*particle packing*) optimum. Campuran pasta yang terdiri dari semen, *fly ash*, *superplasticizer* dan air dirancang untuk mengisi seluruh rongga antar agregat halus (volume rongga = volume pasta). Untuk meningkatkan kemampuan alir agregat halus maka pasta dirancang lebih banyak sebesar 1,3 kali volume rongga antar agregat halus. Langkah berikutnya adalah merancang campuran mortar dengan kemampuan mengalir (*flow mortar*) dan kuat tekan tinggi. Untuk mencapai campuran mortar dengan kriteria ini, dilakukan pengujian terhadap mortar dengan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dan *additive superplasticizer* pada variasi kadar yang berbeda-beda. Komposisi *superplasticizer* yang tepat, digunakan dalam perancangan SCC secara keseluruhan sehingga proses perancangan *mix design* SCC dapat dilakukan secara terstruktur dan menyeluruh. Tahap akhir adalah menentukan jumlah mortar menggunakan KAM 1,8 kali volume rongga kerikil sehingga diperoleh kebutuhan kerikil dalam campuran SCC. Parameter *mix design* untuk perancangan mortar dan SCC disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Parameter *mix design* mortar dan SCC

Parameter perancangan	Koefisien perancangan
Water powder ratio (w/p)	0,35
Komposisi *fly ash* (%)	30, 35, 40, 45, 50
Komposisi SP (%)	1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0
Koefisien absolut pasta	1,3
Koefisien absolut mortar	1,8

2.3. Prosedur Penelitian

Penelitian disusun dengan alur sesuai Gambar 1.



Gambar 1 Alur penelitian

Uji karakteristik material penyusun SCC dilakukan sesuai standar/manual/prosedur pada Tabel 2. Hasil tersebut kemudian digunakan sebagai dasar penyusunan *mix design* untuk mortar dan SCC.

Tabel 2 Jenis pengujian karakteristik material

No.	Jenis Pengujian	Metode Pengujian
1	Kadar lumpur agregat (%)	SNI 03-4142-1996
2	Berat satuan agregat (gr/cm^3)	SNI 03-4804-1998
3	Berat jenis agregat	SNI 1969-2016

		SNI 1970-2016
4	Analisa saringan agregat: Modulus Halus Butir (MHB) Gradasi agregat	SNI ASTM C136:2012
5	Berat jenis *fly ash*	SNI 2531-2015
6	Berat jenis *superplasticizer*	SNI 2531-2015

2.4. Pengujian Karakteristik Beton Segar

Pengujian karakteristik teknis beton segar dilakukan untuk mengetahui kemampuan alir, kemampuan memadat, kemampuan melewati tulangan, kekentalan dan ketahanan terhadap segregasi. Pengujian beton segar dan kriteria penerimaan dilakukan sesuai prosedur dalam EFNARC 2005 dan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Pengujian beton segar dan kriteria penerimaan sesuai EFNARC 2005

Kemampuan	Pengujian	Kriteria penerimaan	Kelas SCC
Fillingability	*Slump flow*	550-850 (mm)	SF1/SF2/SF3
Passingability	*L-box*	0,8	PA1/PA2
Viscocity	*V-funnel*	8-25 (detik)	VF1/VF2
Segregation resistance	*Sieve Segregation*	15-20 (%)	SR1/SR2

2.5. Pengujian Karakteristik Beton Keras

Pengujian beton keras dilakukan saat beton berumur 28 hari. Prosedur pengujian dilakukan menggunakan alat uji tekan (*compression testing machine*) pada benda uji silinder diameter 15 cm dengan tinggi 30 cm. Pengujian meliputi kuat tekan, kuat tarik belah dan modulus elastisitas dengan 3 buah silinder untuk tiap jenis pengujian.

Kuat tekan beton diperoleh melalui pembebanan pada beton keras per satuan luas sampai benda uji hancur. Kuat tekan tiap benda uji ditentukan oleh tegangan tekan tertinggi (f_c') yang dicapai akibat beban tekan selama percobaan. Nilai kuat tekan beton f_c' (Mpa) diperoleh dengan cara membagi beban tekan maksimum P (N) dengan luas penampang benda uji A (mm^2) sesuai Persamaan 1.

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Kuat tarik belah adalah kemampuan beton untuk menahan tegangan tarik sebelum mengalami retakan atau kegagalan (Morib et al., 2021). Ketika beton mengalami beban tarik, kemampuannya untuk menahan tegangan ini menjadi kritis untuk mencegah kerusakan atau kegagalan struktural. Pengujian tarik belah beton dilakukan dengan menggunakan silinder beton yang diletakkan di atas alat penguji dalam posisi horizontal. Beban merata diberikan secara tegak lurus dari atas ke seluruh panjang silinder sesuai SK SNI 03-2491-2002. Nilai kuat tarik dihitung sesuai persamaan 2 dengan f_{ct} adalah kuat tarik belah pada umur 28 hari (MPa), P adalah beban maksimum (N), L adalah tinggi silinder (mm) dan D adalah diameter silinder beton (mm).

$$f_{ct} = \frac{2P}{LD} \quad (2)$$

Hasil pengujian kuat tarik belah digunakan untuk menentukan nilai λ guna memperhitungkan rasio kekuatan tarik terhadap kekuatan tekan. Nilai λ dihitung menggunakan persamaan 3 dan

hasil tersebut digunakan untuk menentukan besaran modulus retak (f_r) pada beton dihitung dengan persamaan 4.

$$\lambda = \frac{f_{ct}}{\alpha\sqrt{f_c'}} \quad (3)$$

$$f_r = 0{,}62\lambda\sqrt{f_c'} \quad (4)$$

Hubungan kuat tekan dan kuat tarik belah tidak selalu linier. Peningkatan kuat tekan belum tentu diikuti dengan peningkatan kuat tarik. Untuk mengetahui hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik belah, diperlukan studi eksperimental (Putra & Widjaja, 2015). Hubungan tersebut disajikan pada persamaan 5.

$$f_{ct} = \alpha\sqrt{f_c'} \quad (5)$$

Koefisien α ditentukan dengan membuat *curve fitting* menggunakan metode *least square approximation.* Pengolahan data menggunakan prosedur sebagai berikut :

$$Y_i = f_{ct} \quad (6)$$

$$X_i = f_c' \quad (7)$$

$$f_{ct} = \alpha f_c' \quad (8)$$

$$Y_i = \alpha\sqrt{X_i} \quad (9)$$

$$E_1 = Y_i - y_i \quad (10)$$

Modulus elastisitas beton adalah ukuran kekakuan beton atau kemampuan beton untuk mengembalikan bentuknya setelah diberi beban. Modulus elastisitas beton menggambarkan perbandingan antara tegangan dan regangan bahan. Modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh umur benda uji, material penyusun serta kekuatan beton. Modulus elastisitas E (MPa) pada pengujian laboratorium menurut (ASTM C469-02, 2002) dihitung dengan persamaan 11 dengan σ_2 adalah 40% tegangan runtuh (MPa), σ_1 adalah tegangan pada saat regangan 0,00005 (MPa), ε_1 adalah regangan 0,000050 dan ε_2 adalah nilai regangan pada saat σ_2.

$$E = \frac{(\sigma_2 - \sigma_1)}{(\varepsilon_2 - 0{,}00005)} \quad (11)$$

Menurut (SNI 2847, 2019), modulus elastisitas beton normal juga dapat dihitung dengan rumus empiris sesuai dengan persamaan 12 dan persamaan 13. Pada persamaan 12, modulus elastisitas hanya dipengaruhi oleh kuat tekan (f_c') sedangkan pada persamaan 13 faktor yang mempengaruhi adalah kuat tekan (f_c') dan berat satuan beton (w_c) antara 1440 dan 2560 kg/m^3.

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} \quad (12)$$

$$E_c = w_c^{1,5}0{,}043\sqrt{f_c'} \quad (13)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Uji Material Penyusun SCC

Hasil pengujian karakteristik material penyusun SCC disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil uji karakteristik material penyusun SCC

Karakteristik Material	Material					
	Semen	Air	*Fly ash*	SP	Pasir	Kerikil
Berat satuan (kg/m^3)	1250	1000	-	-	1480	1550
Berat jenis	3,15	1	2,63	2,34	2,7	2,5
Gradasi	-	-	-	-	II	-
MHB	-	-	-	-	3,82	6,24
Penyerapan air (%)	-	-	-	-	1,01	3,73
Volume rongga (%)	-	-	-	-	45	55

3.2. Rancangan Campuran, Pengujian Aliran dan Kuat Tekan Mortar

Untuk mendapatkan kadar *superplasticizer* yang digunakan pada perancangan SCC, maka disusun *mix design* untuk 1 m^3 mortar menggunakan 40% *fly ash* sebagai pengganti semen (PC-FA40) dengan berbagai variasi *superplasticizer*. Kadar SP terbaik yang menghasilkan *flow mortar* dan kuat tekan maksimum dipilih untuk merencanakan mortar dan SCC selanjutnya. Hasil *mix design* 1m^3 mortar PC-FA40 disajikan pada Tabel 5. Hasil uji konsistensi dan aliran mortar disajikan pada Gambar 2. Pengujian tekan menggunakan 3 buah kubus mortar.

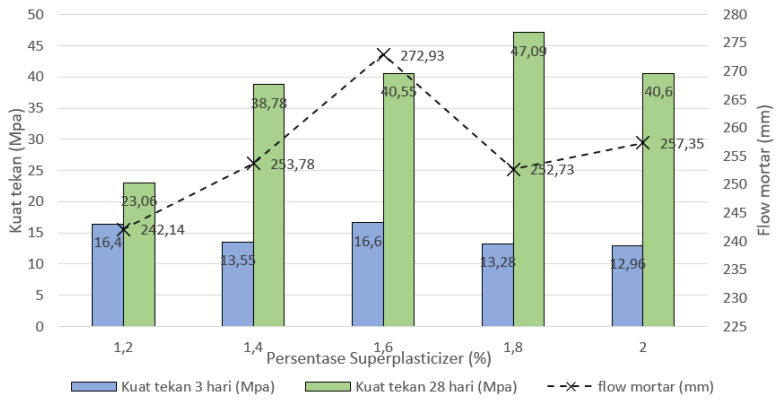
Tabel 5 *Mix design* 1 m^3 mortar PC-FA40 dengan berbagai variasi SP

Kode Benda Uji	**Berat Material per 1 m^3 mortar (kg)**				
	Semen	**Air**	***Fly ash***	**SP**	**Pasir**
SP1,2	504,5	297,8	336,3	10,1	1110,6
SP1,4	503,4	297,8	335,6	11,7	1110,6
SP1,6	502,3	297,7	334,9	13,4	1110,6
SP1,8	501,2	297,6	334,1	15,0	1110,6
SP2,0	500,1	297,5	333,4	16,7	1110,6



Gambar 2 Konsistensi dan aliran mortar PC-FA40 dengan berbagai variasi SP

Konsistensi campuran PC-F40 dengan *w/p* rendah dan tambahan SP sangat baik yaitu tampak dalam bentuk bulat setelah digetarkan 25 ketukan. Pada penggunaan SP 1,8% tampak muncul gelembung udara dalam mortar setelah penggetaran yang berpotensi memunculkan *honeycomb* atau rongga pada beton setelah mengeras. Hal tersebut perlu dihindari dengan mengatur komposisi yang tepat antara *powder*, w/p dan kadar SP yang digunakan. Semakin besar kadar SP campuran menjadi semakin mudah mengalir. Uji tekan dilakukan pada benda uji kubus umur 3 dan 28 hari. Hasil uji kuat tekan dan aliran mortar disajikan pada Gambar 3.



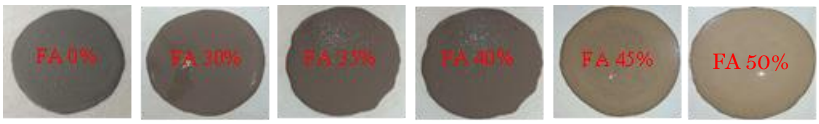
Gambar 3 Hasil uji kuat tekan dan *flow mortar* PC-FA40 dengan variasi SP (hasil analisis)

Kadar *superplasticizer* 1,6% menghasilkan aliran mortar tertinggi yaitu 273 mm dengan kuat tekan 16,6 MPa (3 hari) dan 40,55 MPa (28 hari). Pada umur 28 hari, kuat tekan tertinggi adalah pada penggunaan *superplasticizer* 1,8% dari berat semen yaitu 47,09 MPa. *Superplasticizer* tidak memberi pengaruh besar terhadap kuat tekan pada umur 3 hari, tetapi berdampak pada umur 28 hari. Komposisi *superplasticizer* 1,6% dengan aliran mortar tertinggi digunakan untuk perancangan mortar selanjutnya. *Mix design* 1 m^3 mortar dengan berbagai variasi *fly ash* sebagai pengganti semen menggunakan SP 1,6% disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6 *Mix design* 1 m^3 mortar dengan berbagai variasi *fly ash* menggunakan SP 1,6%

Kode Benda Uji	**Berat Material per 1 m^3 mortar (kg)**				
	Semen	**Air**	***Fly ash***	**SP**	**Pasir**
PC-FA0	868,1	308,7	0	13,9	1110,6
PC-FA30	591,3	300,4	253,4	13,5	1110,6
PC-FA35	546,6	299,0	294,3	13,4	1110,6
PC-FA40	502,3	297,7	334,9	13,4	1110,6
PC-FA45	458,4	296,4	375,0	13,3	1110,6
PC-FA50	414,9	295,1	414,9	13,3	1110,6

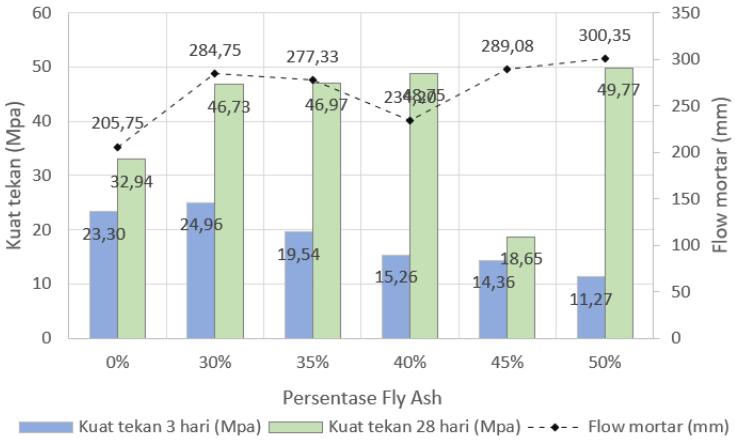
Data pada Tabel 6 digunakan untuk membuat campuran mortar dan benda uji kubus untuk mengetahui pengaruh komposisi *fly ash* terhadap konsisten, aliran dan kuat tekan. Hasil pengujian konsistensi mortar disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 Konsistensi dan aliran mortar dengan berbagai variasi *fly ash* menggunakan SP 1,6%

Gambar 4 menunjukkan warna campuran mortar berubah dari abu-abu menjadi semakin kecoklatan sesuai bertambahnya kadar *fly ash* dan bentuk sebaran setelah 25 ketukan semakin sempurna. Butiran *fly ash* mampu meningkatkan konsistensi campuran mortar dengan sangat

baik. Hasil uji kuat tekan dan *flow mortar* menggunakan SP 1,6% dengan variasi *fly ash* disajikan pada Gambar 5.



Gambar 6 Hasil uji kuat tekan dan *flow mortar* dengan variasi *fly ash* (hasil Analisa)

Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kadar *fly ash* sebagai penganti semen mempengaruhi kuat tekan. PC-FA50 menghasilkan kuat tekan tertinggi yaitu 49,77 MPa, 51% lebih tinggi dari PC-FA0 yang memiliki kuat tekan 32,94 MPa. Penggantian semen dengan *fly ash* pada komposisi tepat dapat meningkatkan kuat tekan. Pada umur 3 hari, peningkatan kadar *fly ash* menurunkan kuat tekan. Hal ini disebabkan karena semen lebih cepat bereaksi pada umur awal mortar. Berkurangnya kadar semen mengakibatkan pada umur awal kuat tekan menurun. *Fly ash* bereaksi lebih lambat karena merupakan pozzolan yang bereaksi dengan air dan kalsium hidroksida ($CaOH_2$) yang merupakan hasil sampingan reaksi hidrasi semen dan meningkatkan kuat tekan pada beton keras (Nurfaizi et al., 2019).

3.3. Hasil Rancangan Campuran SCC

Campuran SCC didesain menggunakan kadar *superplasticizer* 1,8% yang memberikan hasil kuat tekan mortar tertinggi, koefisien absolut pasta 1,3 dan koefisien absolut mortar 1,8. Hasil *mix design* SCC disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 *Mix design* 1 m^3 SCC

Kode	Berat Material per 1 m^3 mortar (kg)					
	Semen	Air	*Fly ash*	SP	Pasir	Kerikil
PC-FA0	576,8	205,5	0	10,4	739,7	828,3
PC-FA30	392,9	200,0	168,4	10,1	739,6	828,3
PC-FA35	363,2	199,1	195,6	10,1	739,6	828,3
PC-FA40	333,8	198,2	222,5	10,1	739,6	828,3
PC-FA45	304,6	197,3	249,2	9,9	739,6	828,3
PC-FA50	275,7	196,5	275,7	9,9	739,6	828,3

3.4. Pengujian Kuat Tekan Bebas

Hasil pengujian reologi beton segar disajikan pada Tabel 8

Tabel 8 Hasil uji beton segar

Kode	Kemampuan	Pengujian	Kriteria penerimaan	Hasil uji	Kelas SCC

PC-FA0	*Fillingability*	*Slump flow*	550-850 (mm)	272,5	TM
	Passingability	*L-box*	0,8	0	TM
	Viscocity	*V-funnel*	8-25 (detik)	52	TM
	Segregation resistance	*Sieve Segregation*	15-20 (%)	7,5	SR2
PC-FA30	*Fillingability*	*Slump flow*	550-850 (mm)	502,5	SF1
	Passingability	*L-box*	0,8	0,25	TM
	Viscocity	*V-funnel*	8-25 (detik)	22	VF2
	Segregation resistance	*Sieve Segregation*	15-20 (%)	1,25	SR2
PC-FA35	*Fillingability*	*Slump flow*	550-850 (mm)	592,5	SF1
	Passingability	*L-box*	0,8	0,51	TM
	Viscocity	*V-funnel*	8-25 (detik)	24	VF2
	Segregation resistance	*Sieve Segregation*	15-20 (%)	6,74	SR2
PC-FA40	*Fillingability*	*Slump flow*	550-850 (mm)	620,0	SF1
	Passingability	*L-box*	0,8	0,53	TM
	Viscocity	*V-funnel*	8-25 (detik)	25	VF2
	Segregation resistance	*Sieve Segregation*	15-20 (%)	1,93%	SR2
PC-FA45	*Fillingability*	*Slump flow*	550-850 (mm)	237,5	TM
	Passingability	*L-box*	0,8	0	TM
	Viscocity	*V-funnel*	8-25 (detik)	30	TM
	Segregation resistance	*Sieve Segregation*	15-20 (%)	7,19	SR2
PC-FA50	*Fillingability*	*Slump flow*	550-850 (mm)	642,5	SF1
	Passingability	*L-box*	0,8	0,85	PA2
	Viscocity	*V-funnel*	8-25 (detik)	17	VF2
	Segregation resistance	*Sieve Segregation*	15-20 (%)	2,71	SR2

Hasil reologi beton SCC menunjukkan bahwa beton dengan 100% semen tidak memenuhi syarat kemampuan alir, memadat, melewati tulangan karena kekentalannya sangat tinggi. Penggunaan *high volume fly ash* meningkatkan kinerja beton segar. Semakin banyak volume *fly ash* maka kemampuan alir, memadat, melewati tulangan, konsistensi dan ketahanan terhadap segregasi meningkat.

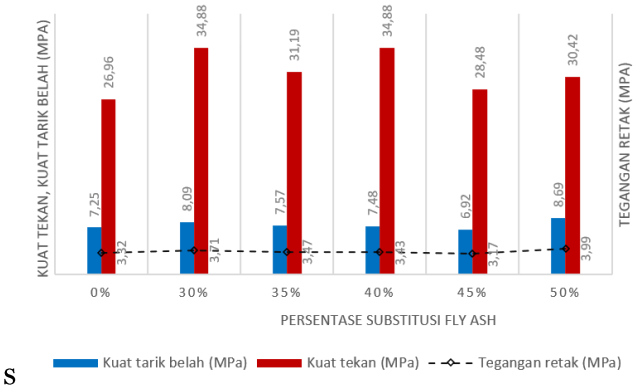
3.5. Pengujian Kuat Tekan Bebas

Pengujian kuat tekan bertujuan untuk mengetahui mutu dari campuran SCC serta pengaruh *high volume fly ash* sebagai pengganti semen terhadap kuat tekan. Pengujian kuat tarik belah bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan beton dalam menahan beban tarik yang merupakan nilai kuat tarik tidak langsung dari beton (f_{ct}). Hasil perhitungan menggunakan metode *least square approximation* diperoleh hubungan kuat tekan dan kuat tarik belah yaitu $f_{ct} = 1{,}37\sqrt{f_c'}\ MPa$. Hasil ini digunakan untuk menentukan nilai λ pada perhitungan tegangan retak beton (f_r). Hasil uji kuat tekan, kuat tarik belah dan tegangan retak SCC disajikan pada Tabel 9 dan Gambar 7.

Tabel 9 Hasil pengujian kuat tekan, kuat tarik belah dan tegangan retak SCC

Kode	Kuat Tekan f'_c (MPa)	Kuat Tarik Belah f_{ct} (MPa)	λ	Tegangan retak f_r (Mpa)
PC-FA0	26,96	7,25	1,03	3,32
PC-FA30	34,88	8,09	1,01	3,71
PC-FA35	31,19	7,57	1,00	3,47
PC-FA40	34,88	7,48	0,94	3,43
PC-FA45	28,48	6,92	0,96	3,17
PC-FA50	30,42	8,69	1,17	3,99

(Regar R, Sumajouw, 2014) menjelaskan bahwa kekuatan beton dipengaruhi rasio penampang dan ukuran agregat maksimum. Semakin kecil rationya semakin kecil pula nilai kekuatan beton yang dihasilkan. Penggunaan agregat maksimum 10 mm memperbesar rasio sehingga kuat tekan beton menjadi lebih besar. Berdasarkan hasil pengujian, dapat dilihat bahwa penambahan *fly ash* (FA) dalam beton SCC tidak selalu meningkatkan kuat tarik belah secara konsisten. Misalnya, beton dengan kadar FA 50% memiliki nilai kuat tarik belah tertinggi yaitu 8,69 MPa, sedangkan kadar FA 45% memiliki nilai terendah yaitu 6,92 MPa. Tegangan retak beton (f_r) merupakan parameter yang mengindikasikan kemampuan beton untuk menahan retakan pada daerah yang mengalami tarik. Nilai f_r dinyatakan dalam MPa dan merupakan hasil langsung dari pengujian tegangan retak pada benda uji beton SCC. Dari tabel, terlihat variasi nilai f_r yang berkisar antara 3,17 MPa hingga 3,99 MPa.

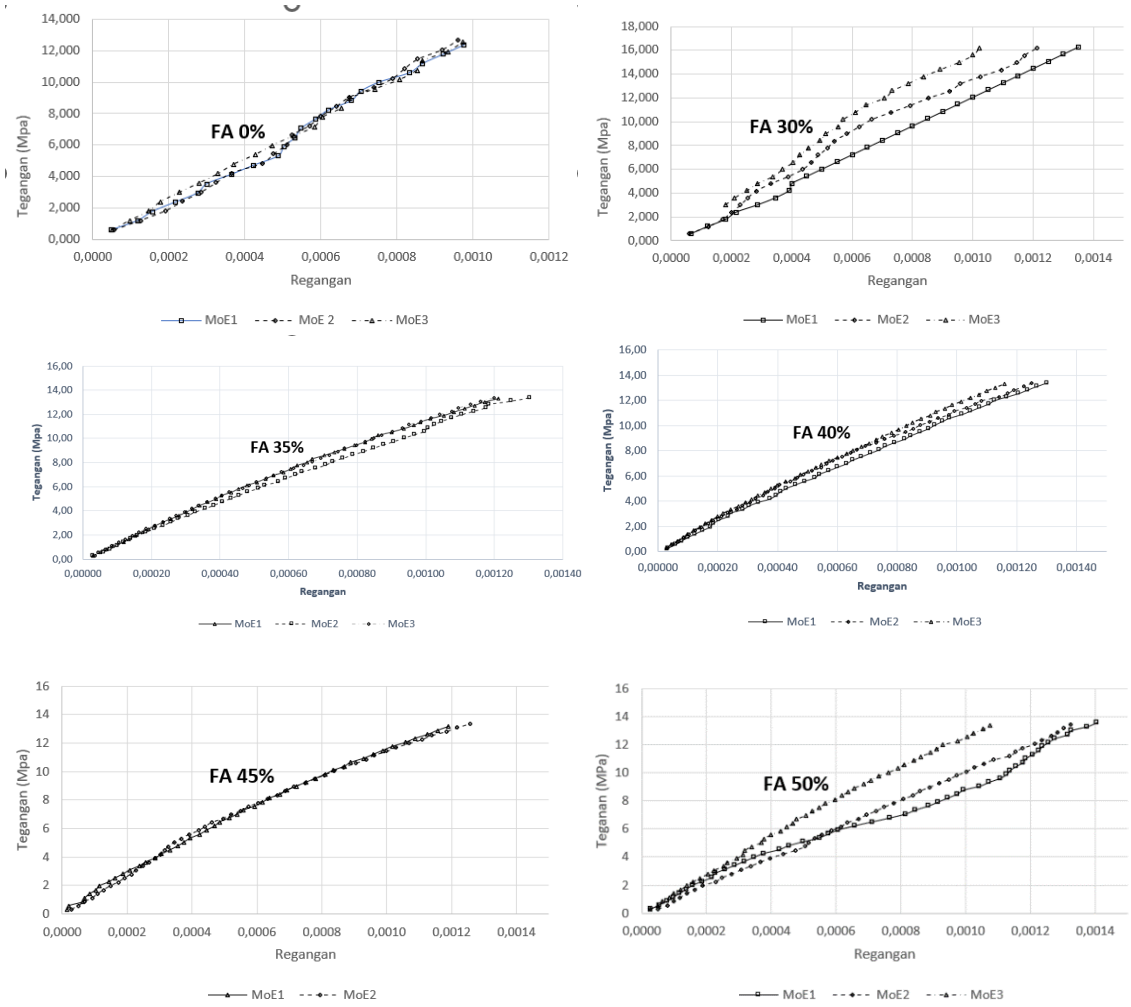


S

Gambar 7 Hasil uji kuat tekan, kuat tarik belah dan tegangan retak SCC

3.6. Pengujian Kuat Tekan Bebas

Modulus elastisitas dapat didefinisikan sebagai rasio antara beban per satuan luas (tegangan) dan perubahan elastis per satuan panjang (regangan). Modulus elastisitas beton bervariasi sesuai dengan kekuatannya. Modulus elastisitas dihitung berdasarkan kombinasi antara modulus secant dan modulus tangent. Garis tangent ditarik antara dua titik, yaitu titik bawah untuk meniadakan pengaruh retak awal pada regangan 0,00005 dan titik atas pada saat tegangan mencapai 40% dari regangan batas. Diagram tegangan regangan untuk berbagai variasi *fly ash* disajikan pada Gambar 8. Modulus elastisitas dihitung menggunakan persamaan 11, 12 dan 13. Hasil perhitungan modulus elastisitas disajikan pada Tabel 10.



Gambar 8 Diagram tegangan regangan SCC dengan berbagai variasi *fly ash*

Tabel 10 Rekapitulasi Hasil pengujian modulus elastisitas SCC

Kode	MoE aktual (Mpa)	MoE SNI 1 (MPa)	MoE SNI 2 (MPa)
PC-FA0	17893,94	22850,45	20453,36
PC-FA30	15873,23	25120,01	21639,03
PC-FA35	11479,12	24610,86	24445,26
PC-FA40	10842,92	25932,78	25977,39
PC-FA45	9128,28	25665,45	25208,01
PC-FA50	10496,88	26302,56	25541,12

Modulus elastisitas menentukan sifat-sifat mekanik beton, seperti kekuatan dan ketahanan lentur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* secara umum mengakibatkan penurunan modulus elastisitas beton. Penurunan terjadi akibat *fly ash* cenderung memiliki sifat pengisi yang kurang reaktif secara hidrolik dibandingkan Semen Portland. Penggunaan *fly ash* mempengaruhi rasio air ke semen dalam campuran beton, yang dapat mengurangi modulus elastisitas karena perubahan karakteristik mekanik pasta beton. Selain itu, penggunaan *fly ash* sering kali mengurangi tegangan permukaan antara pasta semen dan agregat, yang juga dapat mempengaruhi modulus elastisitas secara keseluruhan. Turunnya modulus elastis menunjukkan beton dengan *high volume* fly *ash* menjadi semakin getas. Meskipun kuat tekan beton mengalami peningkatan namun modulus elastis justru turun. Kuat tekan (f_c') pada beton

dengan *high volume fly ash* tidak tepat digunakan untuk menghitung modulus elastisitas menggunakan rumus empiris SNI. Penggunaan *fly ash* dapat memberikan manfaat terhadap lingkungan seperti pengurangan emisi gas CO di udara, namun perubahan dalam sifat mekanik seperti penurunan modulus elastisitas harus diperhitungkan secara hati-hati dalam desain struktur karena modulus elastisitas yang lebih rendah dapat mempengaruhi respons struktural terhadap beban.

4. KESIMPULAN

Beberapa hal dari penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Prosedur *mix design* dapat digunakan dalam perancangan SCC. Mortar dapat berfungsi sebagai media alir agregat kasar dengan baik karena seluruhnya menghasilkan konsistensi dan aliran yang memenuhi syarat. Namun saat dijadikan *mix design* SCC perlu penyesuaian kembali.

2. Hasil reologi beton SCC menunjukkan bahwa beton dengan 100% semen tidak memenuhi syarat kemampuan alir, memadat, melewati tulangan karena kekentalannya sangat tinggi. Penggunaan *high volume fly ash* meningkatkan kinerja beton segar. Semakin banyak volume *fly ash* maka kemampuan alir, memadat, melewati tulangan, konsistensi dan ketahanan terhadap segregasi meningkat.

3. Penggunakan *high volume fly ash* meningkatkan kuat tekan. Hasil dari pengujian kuat tekan berturut-turut menurut komposisi *fly ash* adalah 26,96 MPa, 34,88 MPa, 31,18 MPa, 34,87 MPa, 28,48 MPa, dan 30,28 MPa.

4. Penambahan *fly ash* (FA) dalam SCC tidak selalu meningkatkan kuat tarik belah secara konsisten. Hubungan kuat tekan dan kuat tarik belah hasil eksperimental diperoleh $f_{ct} = 1{,}37\sqrt{f_c'}\ MPa$.

5. Penambahan *fly ash* secara umum mengakibatkan penurunan modulus elastisitas beton sehingga beton menjadi semakin getas. Hasil pengujian tidak sesuai dengan rumus empiris SNI karena meskipun kuat tekan beton mengalami peningkatan namun modulus elastis justru turun. Kuat tekan (f_c') pada beton dengan *high volume fly ash* tidak tepat digunakan untuk menghitung modulus elastisitas menggunakan rumus empiris SNI.

DAFTAR PUSTAKA

Amalia, A., & Riyadi, M. (2019). Kualitas Beton SCC dengan Substitusi Agregat Halus Tailing Tambang Emas Daerah Pongkor. *MEDIA KOMUNIKASI TEKNIK SIPIL*, *25*(1). https://doi.org/10.14710/mkts.v25i1.18500

Anthony Magma Purwowidiatmoko. (2017). *Perancangan Flow Mortar untuk pembuatan Self Compacting Concrete dengan FAS 0,3*. Universitas Gadjah Mada.

ASTM C469-02. (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. *ASTM Standard Book*, *04*.

BSN. (2019). *SNI-2847-2019-Persyaratan-Beton-Struktural-Untuk-Bangunan-Gedung-1*.

Putra, D. M., & Widjaja, D. (2015). HUBUNGAN KUAT TARIK BELAH DENGAN KUAT TEKAN BETON RINGAN DENGAN CRUMB RUBBER DAN PECAHAN GENTENG . *Rekayasa Sipil*, *4*(2), 76–88.

ENFARC. (2005). *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use "The European Guidelines for Self Compacting Concrete."* www.efnarc.org

Morib, M. A., Jacob, O., & Halawa, E. S. (2024). METODE PARTICLE PACKINGDAN REOLOGI BETON SEGAR SELF COMPACTED CONCRETE(SCC). *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XIII*, 36–41.

Morib, Laowo, & Hulu. (2021). Kuat Tekan Dan Kuat Tarik Belah Beton Mutu Tinggi Umur 3 Hari Menggunakan Material Hasil Pembakaran Sebagai Pengganti Sebagian Semen. *Prosiding CEEDRiMS2021*. https://publikasiilmiah.ums.ac.id/xmlui/handle/11617/12686

Morib, M. A., Zai, H. F., & Ariyani, N. (2024). Perancangan Campuran Self Compacted Concrete Berdasarkan Kuat Tekan dan Aliran Mortar Maksimum Menggunakan Agregat Kering Udara. *Jurnal Teknik Sipil, 20*(1), 75–93. https://doi.org/10.28932/jts.v20i1.6401

Morib, Margeritha. A., Telaumbanua, Anugrah. J., & Zebua, Yosua. E. (2024). PERANCANGAN MORTAR SEBAGAI MEDIA ALIR AGREGAT KASAR DALAM SCC MENGGUNAKAN FLY ASHSEBAGAI SUBSTITUSI PARSIAL SEMEN. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil XIII*, 9–16.

Nuraini, K., Budiman, Y. I., & Subrata, B. (2019). Penggunaan abu terbang dalam campuran beton sedikit semen portland. *Dinas Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat, September*.

Nurfaizi, E., Setiya Budi, A., & Adi Kristiawan, S. (2019). *KAPASITAS LENTUR BALOK BETON BERTULANG HIGH VOLUME FLY ASH (HVFA) MEMADAT SEBDIRI DENGAN KADAR FLY ASH 60% TERHADAP BETON NORMAL*.

Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. In *Journal of Advanced Concrete Technology* (Vol. 1, Issue 1).

Regar, R. G., Sumajouw, M. D. J., & Dapas, S. O. (2014). Nilai Kuat Tarik Belah Beton Dengan Variasi Ukuran Dimensi Benda Uji. *Jurnal Sipil Statik, 2*(5).

Setiawati, M. (2018). Fly ash sebagai bahan pengganti semen pada beton. *Prosiding Semnastek*.

Ulitua, L. D., & Gole, R. D. (2023). *Perancangan campuran mortar kering (dry mix) untuk grouting dengan abu ampas tebu sebagai substitusi parsial semen*. Universitas Kristen Immanuel.

Wenno, R., Wallah, S. E., & Pandaleke, R. (2014). Kuat tekan mortar dengan menggunakan abu terbang (fly ash) asal PLTU Amurang sebagai substitusi parsial semen. *Jurnal Sipil Statik, 2*(5).

Widodo, S. (2004). Optimalisasi Kuat Tekan Self-Compacting Concrete Dengan Cara Trial-Mix Komposisi Agregat Dan Filler Pada Campuran Adukan Beton. *Penelitian Saintek*.