

## PENGARUH VARIASI PEMAKAIAN METAKAOLIN SEBAGAI PENGANTI SEBAGIAN SEMEN TERHADAP SIFAT MEKANIS BETON SCC DENGAN PENAMBAHAN *FLY ASH*

Abdullah Azhar Anas<sup>1\*</sup>, Mochamad Solikin<sup>1</sup>, Abdul Rochman<sup>1</sup>, Yenny  
Nurchasanah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Sukoharjo, Jawa Tengah

\*Email: [d100200057@student.ums.ac.id](mailto:d100200057@student.ums.ac.id)

### Abstrak

Kemajuan dalam material konstruksi menuntut inovasi di bidang beton, yang menggabungkan umur panjang, efisiensi, dan pertimbangan lingkungan, salah satunya adalah beton memadat mandiri (SCC), yang dapat memadat sendiri tanpa getaran, adalah salah satu kemajuan tersebut. Studi ini menganalisis dampak kandungan *fly ash* dan metakaolin terhadap sifat mekanik SCC, khususnya modulus elastisitas dan kekuatan tekannya. Penggunaan *fly ash* dan metakaolin sebagai alternatif pengganti semen dalam beton SCC diharapkan dapat mengoptimalkan kemampuan kerja beton segar, sehingga mempermudah aliran beton tanpa segregasi dan meningkatkan kekuatan tekannya. *Fly ash* dimasukkan dengan kadar tetap 20% berat semen, sedangkan metakaolin ditambahkan dalam variasi 2%, 3%, dan 4%. Uji kuat tekan, dan modulus elastisitas, dilakukan pada beton berumur 28 hari. Hasil penelitian ini didapatkan penambahan metakaolin dan *fly ash* ke dalam beton meningkatkan kekuatan tekannya hingga 38,3 MPa, untuk kombinasi 4% metakaolin dan 20% *fly ash*. Peningkatan modulus elastisitas dikaitkan dengan peningkatan kekuatan tekan. Singkatnya, kombinasi 4% metakaolin dan 20% *fly ash* memberikan kinerja mekanik yang baik sekaligus selaras dengan pendekatan ramah lingkungan dalam konstruksi.

**Kata kunci:** *fly ash*; kuat tekan; metakaolin; modulus elastisitas; self-compacting concrete.

### Abstract

*Advances in construction materials demand innovations in concrete, combining longevity, efficiency, and environmental considerations. Self-compacting concrete (SCC), which can compact itself without vibration, is one such advancement. This study analyzes the impact of fly ash and metakaolin content on the mechanical properties of SCC, particularly its elastic modulus and compressive strength. The use of fly ash and metakaolin as alternatives to cement in self-compacting concrete (SCC) is expected to optimize the workability of fresh concrete, thereby facilitating the flow of concrete without segregation and increasing its compressive strength. Fly ash was added at a fixed content of 20% by weight of cement, while metakaolin was added in variations of 2%, 3%, and 4%. Tests on compressive strength, and elastic modulus were conducted on 28-day-old concrete. According to this study, the addition of metakaolin and fly ash to concrete can increase its compressive strength by up to 38.3 MPa, for a combination of 4% metakaolin and 20% fly ash. The increase in elastic modulus is associated with an increase in compressive strength. In short, the combination of 4% metakaolin and 20% fly ash provides good mechanical performance while being in line with an environmentally friendly approach to construction.*

**Keywords:** *compressive strength; fly ash; metakaolin; modulus of elasticity; self-compacting concrete.*

## 1. PENDAHULUAN

Bidang material konstruksi terus berkembang, dengan fokus khusus pada pemenuhan tuntutan akan infrastruktur yang lebih kuat, lebih efisien, dan lebih berkelanjutan. Beton memadat mandiri (SCC) adalah salah satu inovasi yang banyak dikembangkan, karena SCC adalah jenis beton yang mengalir dan memadat sendiri tanpa bantuan getaran eksternal. Jenis beton ini sangat cocok untuk struktur dengan bentuk kompleks atau di area dengan tulangan yang sangat padat. Dalam produksi SCC memerlukan ketelitian terhadap komposisi campuran, khususnya bahan tambahan seperti *superplasticizer* dan bahan *pozzolanik*. *Superplasticizer* bertindak sebagai bahan tambahan kimia yang menghilangkan aglomerat dengan melapisi semen, sehingga mendorong distribusi semen yang seragam dalam campuran dan menghasilkan beton yang sangat mudah dikerjakan dan memiliki kekuatan optimal (Haniza dkk., 2021).

Metakaolin diproduksi melalui kalsinasi kaolin dan mengandung konsentrasi silika dan alumina yang tinggi. Komponen reaktif ini mendorong hidrasi semen, mengurangi porositas, dan meningkatkan kekuatan tekan beton (Wibowo dkk., 2019). Selanjutnya, *fly ash* adalah produk sampingan dari pembakaran batubara, biasanya dihasilkan oleh pabrik dan pembangkit listrik tenaga termal. *Fly ash* adalah bubuk halus dengan sifat

pozzolanik yang kuat. Penggunaan perangkat ini dapat mengoptimalkan kemudahan pengerjaan dan mengurangi emisi CO<sub>2</sub> (Arifi, 2015).

Namun, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi kombinasi optimal *fly ash*, metakaolin, dan *superplasticizer* untuk meningkatkan sifat mekanik SCC, termasuk kekuatan tekan dan modulus elastisitasnya. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menetapkan rasio ideal *fly ash* terhadap metakaolin dalam SCC.

Kekuatan tekan dan modulus elastisitas digunakan untuk menilai kualitas beton. Kekuatan tekan beton mengacu pada beban per satuan luas yang menyebabkan beton retak ketika dikenai gaya tertentu. Elastisitas adalah rasio tekanan yang diberikan terhadap deformasi per satuan panjang. Persamaan di bawah ini menggambarkan hubungan antara modulus elastisitas dan kekuatan tekan beton:

$$E_c = 0,043 (w_c)^{1,5} (f'_c)^{0,5} \text{ (SNI 2847-2013)} \quad (1)$$

Perilaku beton di bawah beban berkaitan dengan kekuatan tekan dan modulus elastisitasnya. Tegangan dan regangan yang dihasilkan menyebabkan perubahan pada beton. Modulus elastisitas yang tinggi menunjukkan rasio tegangan terhadap regangan yang tinggi, artinya beton mengalami deformasi yang lebih sedikit.

### 1.1 Beton

Beton adalah material komposit yang terdiri dari campuran semen, agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil atau batu pecah), air, dan unsur tambahan jika diperlukan. Setelah proses hidrasi, campuran ini akan memadat menjadi massa keras yang mampu menahan beban tekan. Jumlah kombinasi yang digunakan dan kualitas masing-masing material penyusun beton memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas keseluruhannya. Menurut SNI 03-6468-2000, terdapat tiga jenis utama kualitas beton: beton mutu rendah ( $f'_c < 20$  MPa), beton mutu sedang ( $f'_c \leq 41$  MPa), dan beton mutu tinggi ( $f'_c > 41$  MPa). Rasio air terhadap semen (FAS), kualitas bahan-bahan komponen, gradasi dan bentuk agregat, serta prosedur pengolahan dan pemeliharaan (curing), semuanya memiliki dampak yang signifikan terhadap kualitas beton.

Salah satu faktor terpenting dalam pembuatan beton adalah rasio air terhadap semen (FAS), karena nilai FAS yang lebih rendah meningkatkan kuat tekan sekaligus menurunkan kemampuan kerja. *Workability*, *segregation resistance*, dan *bleeding* yang dapat mengakibatkan penurunan kualitas merupakan karakteristik penting beton segar. Beton memiliki banyak manfaat sebagai bahan bangunan, termasuk kuat tekan yang tinggi, ketahanan terhadap api dan keausan, kemudahan pembentukan, dan keterjangkauan. Namun, beton memiliki sejumlah kelemahan, termasuk kuat tarik yang rendah, getas, rentan retak akibat penyusutan dan fluktuasi suhu, serta lapisan kedap air yang tidak sempurna. Oleh karena itu, berbagai inovasi telah dikembangkan untuk meningkatkan kualitas beton selama proses pengembangannya. Inovasi ini mencakup penambahan material seperti *fly ash*, metakaolin, dan *superplasticizer*, yang dapat meningkatkan kekuatan, kemudahan pengerjaan, dan ketahanan material terhadap lingkungan yang keras.

### 1.2 Self-Compacting Concrete (SCC)

Beton Memadat Mandiri (SCC) adalah jenis beton yang mengalir dan memadat hanya dengan memanfaatkan gaya gravitasi tanpa bantuan getaran atau pemadatan mekanis. Beton ini diciptakan untuk memenuhi tuntutan konstruksi kontemporer, yang sering kali melibatkan bentuk cetakan yang rumit, kepadatan tulangan yang tinggi, atau kondisi lapangan yang menantang. Sejak pertama kali diperkenalkan di Jepang pada akhir 1980-an, SCC telah dikembangkan lebih lanjut karena manfaatnya, yang meliputi peningkatan produktivitas, kualitas produk akhir yang lebih baik, dan pengurangan tenaga kerja di lapangan (Wibowo dkk., 2020).

Tiga persyaratan utama yang harus dipenuhi oleh SCC, menurut EFNARC (*European Federation of National Associations Representing for Concrete*): kemampuan mengisi, kemampuan melewati, dan ketahanan segregasi. Kemampuan beton untuk mengisi seluruh cetakan tanpa menggunakan pemadat dikenal sebagai kemampuan mengisi. Kemampuan beton untuk mengalir melalui bagian cetakan yang sempit atau ruang di antara tulangan tanpa tersumbat dikenal sebagai kemampuan melewati. Di sisi lain, ketahanan segregasi mengacu pada kemampuan beton untuk menjaga campurannya tetap homogen selama proses pengecoran tanpa memisahkan agregat kasar dan halus serta pasta semen. *Superplasticizer*, *fly ash*, dan metakaolin adalah beberapa tambahan kimia dan mineral yang digunakan SCC untuk mendapatkan kualitas yang baik. *Superplasticizer* berfungsi meningkatkan kelecakan tanpa menambah air, sedangkan *fly ash* dan metakaolin berperan meningkatkan kekuatan tekan dan ketahanan beton terhadap lingkungan agresif.

Dibandingkan dengan beton tradisional, SCC mempunyai beberapa kelebihan sebagai berikut: tidak memerlukan proses pemadatan, sehingga menghemat waktu dan tenaga; menghasilkan permukaan beton yang lebih halus dan padat; dan karena porositasnya rendah, tingkat ketahanannya tinggi. Selain itu, penggunaan SCC juga mengurangi tingkat kebisingan di area konstruksi karena tidak memerlukan alat vibrator. Namun demikian, SCC juga memiliki beberapa tantangan, seperti kebutuhan pengendalian komposisi campuran yang sangat presisi agar tidak terjadi segregasi, serta biaya produksi yang sedikit lebih tinggi akibat penggunaan bahan tambahan khusus. Secara keseluruhan, SCC merupakan inovasi beton modern yang menawarkan kualitas struktural lebih baik, efisiensi pelaksanaan lebih tinggi, dan mendukung konsep pembangunan berkelanjutan dengan penggunaan bahan substitusi semen yang ramah lingkungan.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menyelidiki pengaruh berbagai bahan tambahan terhadap karakteristik beton melalui pendekatan eksperimental. Persiapan material, pembuatan benda uji, dan pengujian pada beton segar dan beton yang telah mengeras merupakan langkah awal dalam prosedur penelitian.

Berbagai bahan yang direncanakan meliputi semen Portland Tipe I, air, agregat halus ukuran maksimum setelah diayak 4,75 mm, agregat kasar ukuran maksimum 20 mm dan ukuran minimum 9,6 mm, serta bahan tambahan pozzolan seperti *fly ash* 20% dari berat semen dan metakaolin sebagai substitusi terhadap semen sebesar 2%, 3%, dan 4%. Kadar *Superplasticizer* yang digunakan sebesar 1,3% sebagai *admixture*. Metode SNI 03-2834-2000 digunakan untuk mengembangkan campuran beton, dan rasio air-semen dipertahankan sebesar 0,45.

Untuk pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas, benda uji dibuat dalam bentuk silinder berukuran 15 cm x 30 cm sebanyak 24 buah. Untuk pengujian beton segar, dilakukan uji alir *slump* dan *L-Box* dengan metode EFNARC 2002. Untuk memastikan bagaimana campuran memengaruhi karakteristik mekanis dan kemampuan kerja beton. Sebelum pengujian, benda uji tersebut dikeraskan dalam kondisi *curing* selama 28 hari setelah pengecoran.

Mesin Uji Universal (UTM) digunakan di laboratorium untuk menguji kuat tekan dan modulus elastisitas. Metode pengujian yang digunakan adalah kuat tekan. Metode analisis yang digunakan adalah modulus elastisitas secara teoritis. Hasil uji kemudian diperiksa secara deskriptif dan dibandingkan dengan temuan penelitian sebelumnya.

### 2.1 Pengujian Bahan Penyusun Beton

Kadar lumpur, berat jenis, kadar bahan organik, dan gradasi agregat halus merupakan beberapa uji komponen beton untuk agregat halus. Uji abrasi dan berat jenis dilakukan untuk agregat kasar. *Fly ash* dan metakaolin diuji secara visual. Perancangan campuran diatur dalam SNI 03-2834-2000. Hasil uji material dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi Hasil Pengujian Material

Pengujian	Agregat Halus	Agregat Kasar	Standarisasi SNI
Berat Jenis	2,63	2,58	2,5 -
Penyerapan	1,01%	1,27%	<3%
Kandungan Organik	Kuning Muda	-	-
Kadar Lumpur	3,40%	-	<5%
Gradasi	Zona 2	-	-
Abrasi	-	38,90%	<40%

### 2.2 Perancangan Mix Design

Untuk menghasilkan beton dengan kemampuan kerja, kekuatan, dan daya tahan yang dibutuhkan, proporsi kombinasi yang tepat antara semen, air, agregat halus, agregat kasar, dan aditif ditentukan melalui perencanaan desain campuran beton. Pedoman SNI 03-2834-2002 untuk membuat campuran beton standar dirujuk dalam desain campuran ini. Desain campuran beton yang ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi *Mix Design* Beton setiap 1m<sup>3</sup>

Nama Benda Uji	Air kg/m <sup>3</sup>	Semen kg/m <sup>3</sup>	Agregat Halus kg/m <sup>3</sup>	Agregat Kasar kg/m <sup>3</sup>	Metakaolin kg/m <sup>3</sup>	Fly Ash kg/m <sup>3</sup>	<i>Superplasticizer</i> kg/m <sup>3</sup>
MK-FA 2%-20%	165,00	351,12	1007,00	672,00	9,12	91,20	2,15
MK-FA 3%-20%	165,00	305,52	1007,00	672,00	13,68	91,20	2,15
MK-FA 4%-20%	165,00	259,92	1007,00	672,00	18,24	91,20	2,15

### 2.3 Pengujian Parameter Memadat mandiri

Menggunakan kerucut Abrams dan papan aliran untuk uji kemampuan mengisi, dan L-box untuk uji kemampuan melewati, pengujian parameter pemadatan sendiri didasarkan pada EFNARC 2002.

### 2.4 Tahap Pelaksanaan

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Surakarta dan melewati beberapa tahapan penting seperti berikut:

1. Studi Literatur dan Persiapan  
Untuk mengembangkan teori dan membuat material dan peralatan untuk kebutuhan SCC, data dikumpulkan dari berbagai sumber, termasuk buku, jurnal, dan penelitian sebelumnya.
2. Pengujian Bahan  
Komponen beton, seperti agregat halus dan kasar, dievaluasi terlebih dahulu untuk memastikan kesesuaiannya dan memenuhi pedoman SCC. Metakaolin dan *fly ash* juga diuji secara visual.
3. Perencanaan Proporsi Campuran (*Mix Design*)  
Dilakukan perencanaan beberapa variasi campuran beton dengan perbedaan kadar *fly ash*, metakaolin, dan *superplasticizer* untuk menentukan campuran terbaik yang memenuhi kriteria SCC.
4. Pembuatan dan Pengujian Beton Segar  
Setelah beton dicampur menggunakan mixer beton, kualitas segarnya dievaluasi menggunakan uji kotak-L dan tabel alir untuk menentukan ketahanannya terhadap segregasi, kemampuan mengisi, dan kemampuan melewati.
5. Pengujian Beton Keras  
Setelah 28 hari perawatan, kuat tekan beton dan modulus elastisitas diuji menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM).
6. Analisis dan Kesimpulan dari Data  
Setelah menganalisis hasil pengujian untuk memastikan bagaimana perubahan *fly ash* dan metakaolin memengaruhi kekuatan tekan dan modulus elastisitas beton, kesimpulan diambil sesuai dengan tujuan penelitian.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dilakukan pengujian pada beton yang baru dibuat untuk memastikan apakah masing-masing variasi beton memenuhi syarat-syarat beton SCC, yaitu kemampuan mengisi, kemampuan melewati, dan ketahanan pemisahan campuran beton. Pengujian yang dilakukan menggunakan standar EFNARC 2002.

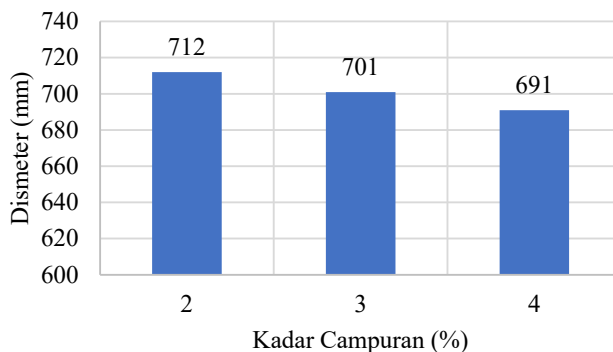
### 3.1 Pengujian Aliran Slump (*Slump Flow Test*)

Alat kerucut Abrams dan papan aliran berukuran 800 mm × 800 mm digunakan dalam pengujian aliran *slump* untuk mengukur seberapa baik campuran beton mengisi cetakan. Berikut hasil pengujian *slump* ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 1.

Tabel 3. Hasil Pengujian Aliran *Slump*

Nama Benda Uji	D <sub>1</sub> (mm)	D <sub>2</sub> (mm)	D <sub>rerata</sub> (mm)	Syarat	Ket.
MK-FA 2%-20%	714	710	712	650-800 mm EFNARC 2002	✓
MK-FA 3%-20%	704	698	701		✓
MK-FA 4%-20%	690	692	691		✓

Keterangan : ✓ = Memenuhi Syarat



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian Aliran *Slump*. (hasil analisis)

Nilai diameter alir *slump* menurun seiring dengan meningkatnya penggunaan metakaolin, berdasarkan tabel dan grafik hasil uji alir *slump*. Temuan ini menunjukkan kesesuaian dengan penelitian Nurkhasan dkk. (2020) bahwa penambahan metakaolin menyebabkan penurunan diameter *slump flow*, dikarenakan sifat metakaolin yang seperti lempung, dimana metakaolin lebih mudah menyerap air daripada semen. Mustawa dkk. (2019) menemukan bahwa semakin tinggi penggunaan metakaolin maka dapat menurunkan diameter *slump flow* dari 705 mm pada kadar 5% ke 655 mm pada kadar 12,5%.

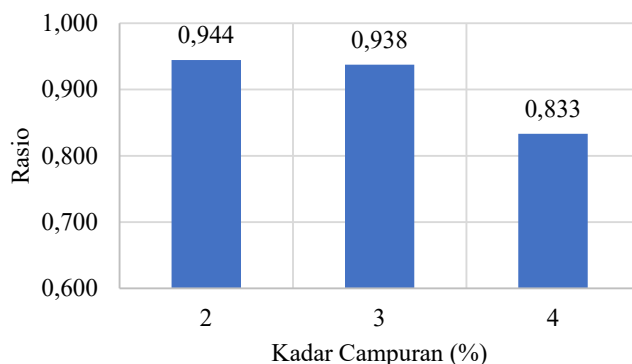
### 3.2 Pengujian Kotak-L (*L-Box Test*)

Pengujian ini dilakukan untuk mengukur kemampuan alir dari beton SCC dengan cara mengevaluasi kemampuannya untuk melewati penghalang sempit, seperti tulangan baja. Alatya berbentuk seperti huruf L yang memiliki dua bagian: bagian vertikal tempat campuran beton dituangkan dan bagian horizontal tempat campuran beton mengalir melewati tulangan baja yang menghalangi di bagian tengah. Berikut hasil pengujian *L-Box* ditampilkan pada Tabel 4 dan Gambar 2.

Tabel 4. Hasil Pengujian *L-Box Test*

Nama Benda Uji	h <sub>2</sub> (mm)	h <sub>1</sub> (mm)	Rasio	Syarat	Ket.
MK-FA 2%-20%	8,5	9	0,944	0,8-1 mm EFNARC 2002	✓
MK-FA 3%-20%	7,5	8	0,938		✓
MK-FA 4%-20%	7,5	9	0,833		✓

Keterangan : ✓ = Memenuhi Syarat

Gambar 2. Grafik Rasio  $h_2/h_1$  pada Pengujian *L-Box*. (hasil analisis)

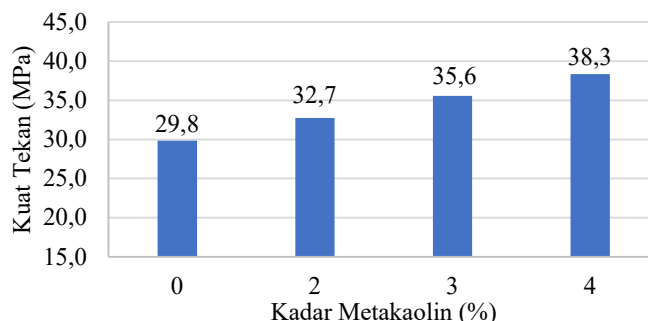
Tabel 4 dan Gambar 2 hasil uji alir *slump* menunjukkan bahwa semakin tinggi penggunaan metakaolin, nilai diameter alir *slump* akan semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi jumlah campuran metakaolin, semakin rendah kemampuan alir beton SCC. Temuan ini sesuai dengan penelitian Wibowo dkk. (2019) yang juga menunjukkan hasil di mana peningkatan kadar metakaolin dapat menurunkan nilai *L-box ratio* dari 0,95 menjadi 0,84 menandakan berkurangnya kemampuan alir beton melewati celah antar tulangan. Penelitian yang dilakukan oleh Nurkhasan dkk. (2020) menunjukkan penurunan nilai *L-box ratio* dari 0,944 pada kadar 12,5% menjadi 0,842 pada kadar 20%, menandakan penurunan kemampuan alir beton melewati celah antar tulangan.

### 3.3 Pengujian Kuat Tekan Beton

Kuat tekan beton diuji menggunakan Mesin Uji Universal (UTM). Dengan memberikan beban pada benda uji hingga mengalami keruntuhan dan mencatat beban tertinggi yang diterimanya, kuat tekan dapat dipastikan. Proporsi pencampuran diikuti dalam persiapan benda uji. Hasil pengujian ditampilkan pada Tabel 5 dan Gambar 3.

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

No.	Nama Benda Uji	Kode Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	Normal - MK-FA 0%	A	30,1	29,8
		B	29,5	
		C	29,9	
2	MK-FA 2%-20%	A	32,6	32,7
		B	33,9	
		C	31,7	
3	MK-FA 3%-20%	A	34,7	35,6
		B	35,6	
		C	36,4	
4	MK-FA 4%-20%	A	39,5	38,3
		B	37,3	
		C	38,2	



Gambar 3. Grafik Hubungan Kuat Tekan Terhadap Kadar Metakaolin. (hasil analisis)

Setelah 28 hari, benda uji silinder digunakan untuk pengujian kuat tekan beton. Hasil pengujian menunjukkan bahwa beton normal memiliki kuat tekan 29,8 MPa, beton SCC MK-FA 2%-20% memiliki kuat tekan 32,7 MPa, beton SCC MK-FA 3%-20% memiliki kuat tekan 35,6 MPa, dan beton SCC MK-FA 4-20% memiliki kuat tekan 38,3 MPa. Beton SCC dianggap memenuhi persyaratan mutu dan dapat digunakan sesuai rencana karena rata-rata kuat tekannya lebih tinggi dari mutu desain ( $f'_c = 30$  MPa). Temuan ini menunjukkan kecenderungan yang sama dengan Nurkhasan dkk. (2020) yang melaporkan bahwa peningkatan kadar metakaolin menyebabkan peningkatan mutu beton akibat reaksi *pozzolan* aktif, memiliki efek pengisian rongga karena ukuran partikel yang lebih halus, dan mengurangi porositas beton. Hasil ini didapatkan oleh Wibowo dkk. (2019) pada penelitiannya yang mengalami peningkatan kuat tekan dari kadar metakaolin 15% dengan 51,601 MPa menjadi 55,969 MPa pada kadar metakaolin 17,5%.

### 3.4 Modulus Elastisitas Beton Secara Teoritis

Modulus elastisitas beton merupakan parameter mekanik yang menunjukkan tingkat kekakuan beton dalam menahan beban. Secara umum, modulus elastisitas didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan dan regangan pada daerah elastis, yaitu sebelum beton mengalami retak atau deformasi permanen. Semakin besar nilai modulus elastisitas, maka semakin kecil regangan yang terjadi akibat pembebanan, sehingga beton tersebut bersifat lebih kaku. Data pembebanan spesimen dicatat, dan nilai modulus elastisitas ditentukan menggunakan pedoman yang tercantum dalam SNI 2847-2013. Modulus elastisitas dihitung menggunakan rumus empiris yang umum digunakan. Hasil perhitungan eksperimen ditampilkan pada Tabel 6.

Misalnya, data spesimen uji silinder dapat digunakan untuk menentukan temuan modulus elastisitas sebagai berikut.:

Penghitungan modulus elastisitas SNI 2847-2013

$$E_c = 0,043(wc)^{1,5}(f'_c)^{0,5} \quad (2)$$

dengan,

- $E_c$  = modulus elastisitas statik (MPa)
- $wc$  = berat satuan beton ( $\text{kg/m}^3$ )
- $f'_c$  = kuat tekan silinder beton (MPa)

Berikut merupakan uraian contoh penghitungan untuk SCC-FA-MK-40-3%

- $f'_c = 40,3$  MPa
- $wc = 2426$   $\text{Kg/m}^3$

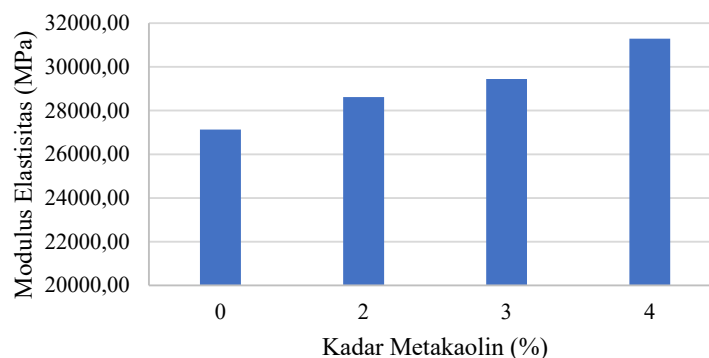
Maka modulus elastisitas beton dapat dihitung dengan memasukkan pada rumus seperti dibawah ini :

$$\begin{aligned} E_c &= 0,043(wc)^{1,5}(f'_c)^{0,5} \\ &= 0,043(2426)^{1,5}(40,3)^{0,5} \\ &= 31.290,79 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Maka hasil modulus elastisitas untuk beton SCC-MK-FA-4-20% sebesar 31.290,79 MPa berdasarkan rumus SNI 2847-2013.

Tabel 6. Hasil Perhitungan Modulus Elastisitas Beton

No	Kode Benda Uji	Parameter	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	Normal- MK-FA -0%	SNI-2847-2013	30,3	27.132,22
2	MK-FA 2%-20%		33,7	28.614,02
3	MK-FA 3%-20%		35,7	29.450,86
4	MK-FA 4%-20%		40,3	31.290,79



Gambar 4. Grafik Hubungan Modulus Elastisitas Terhadap Kadar Metakaolin. (hasil analisis)

Hasil pengujian modulus elastisitas beton dilakukan pada umur 28 hari dengan benda uji berbentuk silinder menunjukkan bahwa beton normal memiliki modulus elastisitas rata-rata 26.792,52 MPa, Beton SCC MK-FA 2-20% sebesar 28.614,02 MPa, Beton SCC MK-FA 3-20% sebesar 29.450,86 MPa, Beton SCC MK-FA 4-20% sebesar 31.290,79 MPa.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa reaksi antara *fly ash* dan metakaolin membentuk struktur beton yang lebih rapat dan padat, yang meningkatkan kekakuan beton SCC dan membuat strukturnya lebih kuat. Secara umum, penggunaan *fly ash* dan metakaolin secara bersamaan dapat saling melengkapi, dengan metakaolin memperbaiki aliran beton dan metakaolin meningkatkan kekuatan awalnya.

#### 4. KESIMPULAN

Hasil penelitian dan pembahasan mengenai beton *Self Compacting Concrete* (SCC) dengan variasi metakaolin dan penambahan *fly ash* menghasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Temuan penelitian tentang bagaimana variasi metakaolin sebagai pengganti sebagian semen dengan menggunakan *fly ash* sebagai bahan tambah yang mempengaruhi kemampuan kerja beton SCC menunjukkan bahwa semakin banyak variasi metakaolin yang digunakan, semakin berkurang kemampuan kerja beton tersebut.
2. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan variasi metakaolin meningkatkan nilai kuat tekan SCC dari 29,8 MPa pada kadar 0% menjadi 38,3 MPa pada variasi 4%. Temuan ini menunjukkan kesesuaian dengan penelitian sebelumnya, yang umumnya menyatakan bahwa peningkatan kadar metakaolin menurunkan workabilitas namun meningkatkan mutu beton.
3. Hasil dari pengaruh variasi metakaolin terhadap modulus elastisitas beton SCC didapatkan hasil pada kadar 0% dengan rata-rata 27.132,22 MPa menjadi 31.290,79 pada kadar 4%.

#### DAFTAR PUSTAKA

Arifi, Eva, 2015, Agregat Daur Ulang, Pemanfaatan Fly Ash Sebagai Pengganti Semen Parsial Untuk Meningkatkan Performa Beton Agregat Daur Ulang, *Rekayasa Sipil*, vol 9(3), hal 229–235.

- Badan Standardisasi Nasional, 2000, SNI 6468:2000 Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi Dengan Semen Portland Dengan Abu Terbang.
- Badan Standardisasi Nasional, 2002, SNI 2834:2002 Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal.
- Badan Standardisasi Nasional, 2019, SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.
- EFNARC, 2002, *Specification And Guidelines For Self-Compacting Concrete*.
- Haniza, S., Jusi, U., & Saputra, A., 2021, Analisis Karakteristik Beton Self Compacting Concrete Terhadap Penambahan Superplasticizer Master Gelenium ACE 8595, *Journal of Infrastructure and Civil Engineering*, vol 1(1), hal 68–76.
- Mustawa, K., Wibowo, W., & Safitri, E., 2019, Pengaruh Kadar Metakaolin Terhadap Kuat Tekan Pada High Strength Self Compacting Concrete (HSSCC) Usia 14 Dan 28 Hari, *Matriks Teknik Sipil*, vol 7(4).
- Nurkhasan, S. S., Wibowo, W., & Safitri, E., 2020, Pemenuhan Kriteria Beton Memadat Mandiri Dengan Variasi Metakaolin Terhadap Kajian Kuat Tekan Tinggi Dan Modulus Elastisitas, *Matriks Teknik Sipil*, vol 8(1).
- Wibowo, W., Safitri, E., & Deni, D. P., 2020, Kajian Karbonasi Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Komposisi Metakaolin, *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, vol 4(1).
- Wibowo, W., Sunarmasto, S., & Rashad, H., 2019, Kajian Kuat Tarik Langsung Dan Kuat Lekat Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Kadar Metakaolin, *Matriks Teknik Sipil*, vol 7(4), hal 458–465.