

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

Vigi Pratama^{1*}, Mochamad Solikin¹, Abdul Rochman¹, Yenny Nurhasanah¹

¹Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Sukoharjo, Jawa tengah

*Email: d100200263@student.ums.ac.id

Abstrak

Inovasi beton yang tidak hanya kuat dan tahan lama, tetapi juga efektif dan ramah lingkungan diperlukan untuk kemajuan teknologi material konstruksi. Beton Memadat Mandiri (SCC), beton yang dapat memadat sendiri tanpa getaran, adalah salah satu penemuan tersebut. Tujuan artikel ini adalah untuk mengkaji bagaimana perubahan abu terbang (*fly ash*) dan metakaolin memengaruhi karakteristik mekanis SCC, yaitu modulus elastisitas dan kuat tekannya. Penggunaan abu terbang dan metakaolin diharapkan dapat meningkatkan kemampuan kerja campuran segar, sehingga beton dapat mengalir lebih lancar tanpa segregasi dan meningkatkan kuat tekannya. Metakaolin ditambahkan dengan persentase tetap 3% dari berat semen, dengan variasi abu terbang sebesar 20%, 30%, dan 40%. Uji kuat tekan, dan modulus elastisitas dilakukan pada beton berumur 28 hari. Berdasarkan studi ini, penambahan abu terbang dan metakaolin pada beton dapat meningkatkan kuat tekannya hingga 39,5 MPa pada variasi 40% abu terbang dan 3% metakaolin. Nilai modulus elastisitas cenderung meningkat seiring dengan meningkatnya kuat tekan beton. Kesimpulannya, kombinasi 40% abu terbang dan 3% metakaolin menghasilkan performa mekanik tertinggi, serta mendukung prinsip konstruksi berkelanjutan.

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

Abstract

Concrete innovations that are not only strong and durable, but also effective and environmentally friendly are needed for the advancement of construction material technology. Self-Compacting Concrete (SCC), concrete that can compact itself without vibration, is one such invention. The purpose of this article is to examine how changes in fly ash and metakaolin affect the mechanical characteristics of SCC, namely its elastic modulus and compressive strength. The use of fly ash and metakaolin is expected to improve the workability of fresh mixes, so that the concrete can flow more smoothly without segregation and increase its compressive strength. Metakaolin was added at a fixed percentage of 3% of the cement weight, with variations in fly ash of 20%, 30%, and 40%. Compressive strength and elastic modulus tests were conducted on 28-day-old concrete. Based on this study, the addition of fly ash and metakaolin to concrete can increase its compressive strength up to 39.5 MPa at variations of 40% fly ash and 3% metakaolin. The elastic modulus value tends to increase with increasing concrete compressive strength. In conclusion, the combination of 40% fly ash and 3% metakaolin produces the highest mechanical performance, and supports the principles of sustainable construction.

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

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi material konstruksi terus meningkat, terutama dalam menghasilkan material yang lebih kuat, efisien, dan berkelanjutan. Salah satu inovasi yang kini banyak dikembangkan adalah *Self-Compacting Concrete* (SCC), beton yang mampu mengalir dan memadat secara otomatis tanpa bantuan getaran eksternal, sehingga cocok untuk struktur dengan bentuk kompleks atau kepadatan tulangan tinggi. Beton ini memiliki *workability* tinggi, kuat tekan baik, tahan api, dan durabilitas tinggi (Pambudi dkk., 2019).

Dalam pembuatannya, SCC memerlukan kontrol ketat terhadap komposisi bahan tambah seperti *superplasticizer* dan pozzolan. *Superplasticizer* berfungsi melarutkan gumpalan pada pasta semen sehingga campuran beton menjadi lebih merata, meningkatkan *workability*, dan membantu menghasilkan kuat beton yang optimal (Hadori dkk., 2015). Bahan pozzolan seperti metakaolin dan abu terbang berperan dalam peningkatan kekuatan serta efisiensi penggunaan semen.

Metakaolin merupakan hasil kalsinasi kaolin yang kaya silika dan alumina. Material ini bersifat reaktif dan mampu mempercepat proses hidrasi semen, mengurangi porositas, serta meningkatkan kekuatan tekan beton (Wibowo dkk., 2019). Sementara itu, abu terbang merupakan hasil pembakaran batubara yang kaya akan

oksida silika, alumina, dan besi. Penggunaannya dapat meningkatkan *workability* serta menekan emisi CO₂ (Arifi, 2015).

Namun, penelitian lebih lanjut masih diperlukan untuk menentukan kombinasi abu terbang, metakaolin, dan superplasticizer yang ideal untuk karakteristik mekanis SCC, terutama kuat tekan dan modulus elastisitasnya. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan rasio ideal abu terbang dan metakaolin pada SCC.

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 abu terbang, 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. SCC telah dikembangkan lebih lanjut karena dapat meningkatkan produktivitas, kualitas produk akhir yang lebih baik, dan pengurangan tenaga kerja di lapangan.

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 pematik 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.

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.

Kekakuan beton dalam menahan deformasi elastis ditunjukkan oleh modulus elastisitasnya. Saat diberi beban, beton dengan modulus elastisitas tinggi dapat menahan deformasi. Modulus elastisitas beton dapat ditentukan secara empiris menggunakan rumus sesuai SNI 2847:2019 melalui persamaan berikut:

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

dengan,

E_c = modulus elastisitas static (MPa)

wc = berat satuan beton (kg/m^3)

$f'c$ = kuat tekan silinder beton (MPa)

Penelitian mengenai penggunaan abu terbang dan metakaolin pada beton telah banyak dilakukan. Menurut penelitian Wibowo dkk. (2018), Mustawa dkk. (2019), dan Nurkhasan dkk. (2020) meneliti penggunaan metakaolin pada beton mutu tinggi memadat mandiri, sedangkan Liu dkk. (2023) mengkaji sifat mekanis beton SCC dengan abu terbang. Namun, penelitian yang membahas variasi proporsi abu terbang sebagai pengganti sebagian semen dengan penambahan metakaolin pada SCC nonmutu tinggi masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui proporsi optimal abu terbang dan metakaolin guna memperoleh kinerja mekanis SCC yang paling efektif.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menyelidiki pengaruh variasi bahan tambah terhadap karakteristik beton SCC. Tahapan penelitian meliputi persiapan material, pembuatan benda uji, pengujian beton segar dan beton keras, serta analisis hasil pengujian. Perancangan campuran beton menggunakan metode SNI 03-2834:2002 dengan rasio faktor air semen sebesar 0,45.

Benda uji yang digunakan berbentuk silinder berukuran 15 cm \times 30 cm untuk pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas. Bahan penyusun campuran SCC terdiri atas semen Portland tipe I, air, agregat kasar, agregat halus, abu terbang, metakaolin, dan *superplasticizer*. Agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran maksimum 20 mm dan ukuran minimum 9,6 mm, sedangkan agregat halus memiliki ukuran maksimum setelah diayak 4,75 mm. Abu terbang sebagai substitusi terhadap semen sebesar 20%, 30%, dan 40%. Metakaolin dengan pemakaian sebesar 3%. *Superplasticizer Sika-Viscocrete 1003* digunakan sebagai *admixture*.

Metode pengujian yang digunakan meliputi pengujian beton segar dan beton keras. Pengujian beton segar dilakukan menggunakan uji *slump flow* dan *L-box* untuk mengetahui kemampuan alir dan kemampuan melewati tulangan pada SCC berdasarkan metode EFNARC 2002. Benda uji yang telah dicetak kemudian dilakukan *curing* selama 28 hari sebelum dilakukan pengujian beton keras. Pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas dilakukan di laboratorium menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM).

Metode analisis yang digunakan adalah analisis deskriptif dengan membandingkan hasil pengujian setiap variasi campuran terhadap karakteristik mekanis dan kemampuan kerja beton SCC. Hasil pengujian kemudian dibandingkan dengan penelitian terdahulu untuk mengetahui pengaruh variasi abu terbang dan penambahan metakaolin terhadap sifat beton SCC.

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. Abu terbang dan metakaolin diuji secara visual. Perancangan campuran diatur dalam SNI 03 2834:2002. 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 1m³

Nama Benda Uji	Air kg/m ³	Semen kg/m ³	Agregat Halus kg/m ³	Agregat Kasar kg/m ³	Metakaolin kg/m ³	Fly Ash kg/m ³	Superplasticizer kg/m ³
FA-MK 20%-3%	165,00	351,12	1007,00	672,00	13,68	91,20	2,15
FA-MK 30%-3%	165,00	305,52	1007,00	672,00	13,68	136,80	2,15
FA-MK 40%-3%	165,00	259,92	1007,00	672,00	13,68	182,40	2,15

2.3 Pengujian Parameter Memadat Mandiri

Menggunakan kerucut Abrams dan papan aliran untuk uji kemampuan mengisi, dan kotak-L 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 abu terbang juga diuji secara visual.

3. Perencanaan Proporsi Campuran (*Mix Design*)

Dilakukan perencanaan beberapa variasi campuran beton dengan perbedaan kadar abu terbang, 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 abu terbang 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.

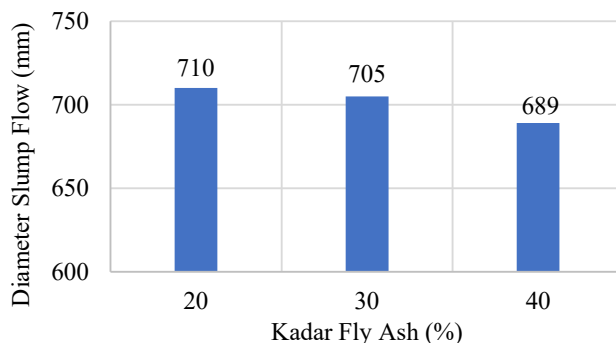
3.1 Pengujian Aliran Slump (*Slump Flow Test*)

Alat kerucut Abrams dan papan aliran berukuran 800 mm × 800 mm digunakan dalam pengujian aliran *slump* untuk mengukur seberapa baik campuran beton mengisi cetakan. Hasil pengujian *slump* ditampilkan pada Tabel 3 dan Gambar 1.

Tabel 3. Hasil pengujian aliran *slump*

Nama Benda Uji	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _{rerata} (mm)	Syarat	Ket.
SCC FA-MK 20-3%	723	697	710	650-800 mm EFNARC 2002	✓
SCC FA-MK 30-3%	715	695	705		✓
SCC FA-MK 40-3%	685	693	689		✓

Keterangan : ✓ = Memenuhi Syarat

Gambar 1. Grafik hasil pengujian aliran *slump*. (hasil analisis)

Nilai diameter alir *slump* menurun seiring dengan meningkatnya penggunaan abu terbang, berdasarkan tabel dan grafik hasil uji alir *slump*. Hasil ini cenderung berbeda dengan penelitian Durga dkk. (2023), bahwa peningkatan penggunaan abu terbang mengakibatkan diameter *slump flow* meningkat dari 665 mm dengan proporsi 15% menjadi 680 mm dengan proporsi 25%. Menurut Nivedha dkk. (2025), diameter *slump flow* meningkat dari 747 mm dengan proporsi 10% menjadi 785 mm dengan proporsi 20%

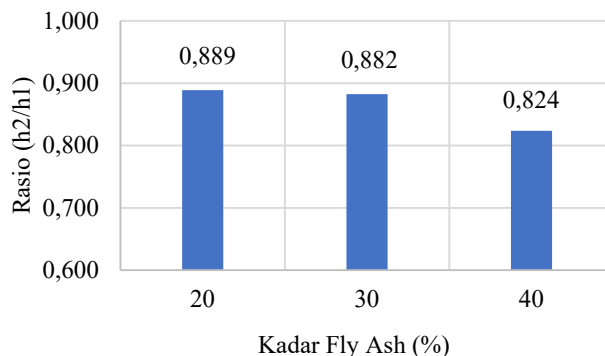
3.2 Pengujian Kotak-L (*L-Box Test*)

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. Hasil pengujian *L-box* ditampilkan pada Tabel 4 dan Gambar 2.

Tabel 4. Hasil pengujian *l-box test*

Nama Benda Uji	h ₂ (mm)	h ₁ (mm)	Rasio	Syarat	Ket.
SCC FA-MK 20-3%	8	9	0,889	0,8-1 mm EFNARC 2002	✓
SCC FA-MK 30-3%	7,5	8,5	0,882		✓
SCC FA-MK 40-3%	7	8,5	0,824		✓

Keterangan : ✓ = Memenuhi Syarat

Gambar 2. Grafik rasio h₂/h₁ pada pengujian *l-box*. (hasil analisis)

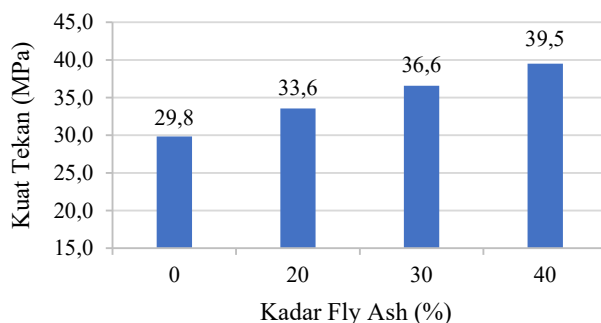
Tabel 4 dan gambar 2 hasil uji alir *slump* menunjukkan bahwa semakin tinggi penggunaan abu terbang, nilai diameter alir *slump* akan semakin menurun. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi jumlah campuran abu terbang, semakin rendah kemampuan alir beton SCC. Temuan cenderung berbeda dengan penelitian Durga dkk. (2023), bahwa dalam penelitian mereka menunjukkan peningkatan kandungan *fly ash* meningkatkan nilai dari 0,90 pada kandungan 20% menjadi 0,93 pada kandungan 30%. Penelitian Kurniadi dkk. (2022) menyajikan bahwa nilai rasio *L-Box* meningkat dari 0,90 pada kandungan 25% menjadi 0,96 pada kandungan 30%, menunjukkan peningkatan aliran beton yang 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 pada umur 28 hari

No.	Nama Benda Uji	Kode Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	Normal FA-MK 0%	A	30,1	29,8
		B	29,5	
		C	29,9	
2	SCC FA-MK 20-3%	A	32,6	33,6
		B	33,9	
		C	34,2	
3	SCC FA-MK 30-3%	A	37,7	36,6
		B	35,6	
		C	36,4	
4	SCC FA-MK 40-3%	A	40,1	39,5
		B	39,5	
		C	38,9	



Gambar 3. Grafik hubungan kuat tekan terhadap kadar *fly ash*. (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 FA-MK 20-3% memiliki kuat tekan 33,6 MPa, beton SCC FA-MK 30-3% memiliki kuat tekan 36,6 MPa, dan beton SCC FA-MK 40-3% memiliki kuat tekan 39,5 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 cenderung berbeda dengan penelitian Ahmad dkk. (2020) ditunjukkan bahwa peningkatan kadar *fly ash* menyebabkan penurunan kualitas beton akibat keterlambatan reaksi pozzolan pada suhu ruang, rendahnya kualitas *fly ash*, dan berkurangnya jumlah semen aktif. Penelitian Destyanto dkk. (2018) mengindikasikan bahwa dengan kadar *fly ash* 20%, kekuatan tekan menurun menjadi 36,41 MPa, dan dengan 30%, menurun menjadi 33,20 MPa.

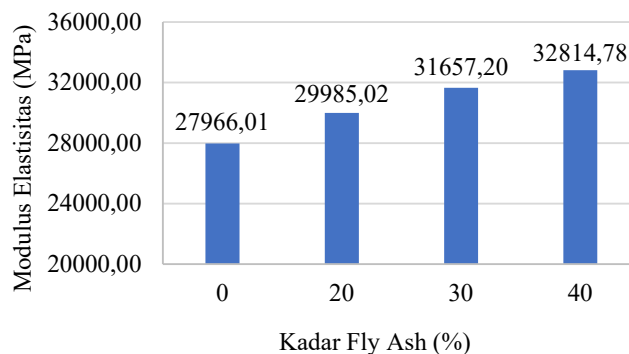
3.4 Modulus Elastisitas Beton Secara Teoritis

Modulus elastis beton adalah sebuah parameter mekanik yang menunjukkan seberapa kaku beton ketika menahan beban. Modulus elastis biasanya didefinisikan sebagai rasio antara tegangan dan regangan dalam daerah elastis, yaitu sebelum beton mengalami retak atau deformasi permanen. Semakin tinggi nilai modulus elastisitas, semakin kecil regangan yang disebabkan oleh beban, yang membuat beton menjadi lebih kaku.

Secara teoritis, nilai modulus elastis untuk beton dalam perencanaan struktur dapat ditentukan menggunakan persamaan empiris yang berdasarkan kekuatan tekan beton.

Tabel 6. Hasil perhitungan modulus elastisitas beton pada umur 28 hari

No	Kode Benda Uji	Parameter	Kuat Tekan (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	Normal FA-MK 0%	SNI 2847:2019	30,3	27.966,01
2	SCC FA-MK 20-3%		33,4	29.985,02
3	SCC FA-MK 30-3%		37,1	31.657,20
4	SCC FA-MK 40-3%		40,8	32.814,78



Gambar 4 Grafik hubungan modulus elastisitas terhadap kadar *fly ash*. (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 27.966,01 MPa, beton SCC FA-MK 20-3% didapat 29.985,02 MPa, beton SCC FA-MK 30-3% didapat 31.657,20 MPa, beton SCC FA-MK 40-3% didapat 32.814,78 MPa.

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

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan pada beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) dengan variasi abu terbang dan penambahan metakaolin, dapat diketahui bahwa penggunaan abu terbang sebagai pengganti sebagian semen memengaruhi kemampuan kerja beton SCC. Semakin besar kadar abu terbang yang digunakan, maka *workability* beton cenderung menurun. Namun, di sisi lain penggunaan abu terbang dan metakaolin memberikan pengaruh yang baik terhadap sifat mekanis beton. Hal ini terlihat dari meningkatnya nilai kuat tekan beton SCC, yaitu dari 29,8 MPa pada kadar abu terbang 0% menjadi 39,5 MPa pada kadar 40%. Selain itu, nilai modulus elastisitas juga mengalami peningkatan dari rata-rata 27.966,01 MPa menjadi 32.814,78 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi abu terbang dan metakaolin dapat meningkatkan kepadatan serta kekuatan beton SCC sehingga menghasilkan mutu beton yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, J., Talha, I. M., Manan, A., Zaid, O., Ullah, R., & Abbas, G., 2020, Evaluating the Effect of Fly Ash on the Rheological and Mechanical Performance of Self-Compacted Concrete, *Journal of Civil & Environmental Engineering*, hal 10.
- Arifi, E., 2015, 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.
- Destyanto, B. T., 2018, Pengaruh Fly Ash Sebagai Material Pengganti Semen Pada Campuran Beton SCC Terhadap Kuat Tekan Dan Porositas Beton, *Rekayasa Teknik Sipil*, vol 02(02), hal 141–149.
- Durga R. M., & Dey, S., 2023, Characterization of Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete by Fly Ash and Cement, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, hal 1-14.
- EFNARC, 2002, Specification and Guidelines For Self-Compacting Concrete.
- Hadori, A., Pranoto, Y., & Sutarto, T. E., 2015, Pengujian Kuat Tekan Beton dengan Penambahan Fly Ash dan Admixture Superplasticizer, *Politeknik Negeri Samarinda*, VII(1), hal 50–55.
- Kurniadi, E., & destyawan, A., 2022, Kajian Kuat Tekan dan Geser Interface pada Beton SCC dengan Pemanfaatan Fly Ash sebagai Substitusi Semen, *Jurnal Nasional Teknologi Terapan (JNTT)*, vol. 4(1).
- Liu, J., Zang, S., Yang, F., Hai, R., & Yan, Y., 2023, Fracture Properties of Steel Fibre Reinforced High-Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete, *Case Studies in Construction Materials*, vol 18.
- Mustawa, K. M. I., Wibowo, W., & Safitri, E., 2019a, Pengaruh Kadar Metakaolin Terhadap Kuat Tekan Pada High Strength Self-Compacting Concrete (HSSCC) Usia 14 dan 28 Hari, *Matriks Teknik Sipil*, vol 7(4), hal 496-501.
- Nivedha, J. K., Mallik, M., & Priya, M. G., 2025, Performance and Microstructural Evaluation of Sustainable Self-Compacting Concrete Incorporating Eggshell Powder and Fly Ash as Environmentally Sustainable Cement Replacements, *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, hal 1-29.
- 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).
- Pambudi, C. D., Budi, A. S., & Kristiawan, S. A., 2019, Kajian Uji Geser Murni Beton HVFA Memadat Sendiri teradap Beton Normal, *Matriks Teknik Sipil*, vol 7(4).
- Wibowo, W., Mediyanto, A., & Lathifah, P., 2018, Kajian Modulus Elastisitas Pada Beton Mutu Tinggi Memadat Mandiri Dengan Variasi Penambahan Bahan Metakaolin, *Matriks Teknik Sipil*, vol 6(3).
- 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.