

KAJIAN KUAT DESAK DAN MODULUS ELASTISITAS BETON MUTU TINGGI DENGAN BAHAN TAMBAH FLY ASH MENGGUNAKAN ANALISIS MIKROSTRUKTUR

Wibowo¹, Endah Safitri², Eriszha Berti Navelia

^{1,2}) Pengajar Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

³) Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

Jalan Ir. Sutami Nomor 36A Ketingan Surakarta 57126. Telepon: (0271) 647069. Email: eriszhaberti@gmail.com

Abstract

Concrete is one of the most building material that widely used. This case, makes the exploitation of cement become unavoidable. One of the solution is using fly ash as mineral admixture that can reduce the porosity of concrete. The addition of fly ash in concrete mixture can increase the compressive strength and modulus elasticity. The method used in this research is experimental, to study the compressive strength and modulus elasticity of high strength concrete with fly ash using microstructure analysis. This research was conducted at the concrete's age of 7, 14, 21, and 28 days. Fly ash that used was 65% from the weight of cement and the specimens that used were cylindrical with a diameter of 7.5 cm and a height of 15 cm. The test that include are material test, slump test, compressive strength and modulus elasticity test, microstructure test. The compressive strength and modulus elasticity percentage of concrete with fly ash compared to concrete without any addition at 7, 14, 21 and 28 days are -22.78%; -14.02%; -15.96%; 7.13% for compressive strength and -8.87%; -5.38%; -5.62%; 2.65% for modulus elasticity. The decrease of pore volume percentage of concrete with fly ash compared to concrete without any addition at 7, 14, 21, and 28 days are 24.14%; 28.57%; 29.17%; 31.82%.

Keywords: compressive strength, fly ash, high strength concrete, microstructure, modulus elasticity

Abstrak

Beton adalah salah satu material bangunan yang penggunaannya semakin meningkat. Hal ini membuat eksploitasi semen tidak dapat dihindarkan. Salah satu solusinya adalah memanfaatkan fly ash sebagai bahan tambah pengganti semen yang mampu memperkecil nilai porositas beton. Penambahan fly ash dapat meningkatkan kuat desak dan modulus elastisitas beton. Metode penelitian yang digunakan adalah eksperimental, untuk mengkaji kuat desak dan modulus elastisitas beton mutu tinggi dengan bahan tambah fly ash menggunakan analisis mikrostruktur. Penelitian dilakukan pada umur ke 7, 14, 21, dan 28 hari. Kadar fly ash yang digunakan sebesar 65% dan benda uji yang digunakan berbentuk silinder berdiameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Pengujian yang dilakukan meliputi uji material, uji slump, uji kuat desak, uji modulus elastisitas dan uji mikrostruktur. Persentase peningkatan nilai kuat desak dan modulus elastisitas beton dengan bahan tambah fly ash terhadap beton tanpa bahan tambah pada hari ke 7, 14, 21, dan 28 adalah -22,78%; -14,02%; -15,96%; 7,13% untuk kuat desak dan -8,87%; -5,38%; -5,62%; 2,65% untuk modulus elastisitas. Persentase penurunan nilai volume pori beton dengan bahan tambah fly ash terhadap beton tanpa bahan tambah pada umur ke 7, 14, 21, dan 28 adalah sebesar 24,14%; 28,57%; 29,17%; 31,82%.

Kata Kunci : beton mutu tinggi, fly ash, kuat desak, mikrostruktur, modulus elastisitas

PENDAHULUAN

Konstruksi adalah salah satu sektor dengan kemajuan yang cukup pesat dan terus berkembang.. Hal ini tidak terlepas dari gencarnya pembangunan infrastruktur yang terus dilakukan secara berkelanjutan. Perkembangan ini membuat permintaan beton sebagai material utama yang juga terus meningkat baik dari segi kuantitas dan juga kualitasnya. Oleh karena itu, berbagai macam inovasi telah dikembangkan untuk mendapatkan komposisi yang terbaik sesuai mutu yang diinginkan. Salah satunya adalah beton mutu tinggi atau *High Strength Concrete* (HSC).

Namun tingkat penggunaan beton dan beton mutu tinggi sebagai material utama dalam konstruksi membuat eksploitasi semen menjadi hal yang tidak dapat dihindarkan. Eksploitasi berlebihan ini tentunya akan berdampak pada kerusakan lingkungan. Oleh karena itu, salah satu solusi yang tepat adalah dengan menggunakan bahan tambah mineral sebagai alternatif pengganti semen.

Pada penelitian ini digunakan bahan tambah mineral berupa fly ash. Fly ash dapat berfungsi sebagai filler yang mengisi celah-celah pada beton sehingga lebih padat atau mampat. Selain itu untuk menjaga *workability* beton ditambahkan pula *superplasticizer* pada campuran beton. Penambahan bahan tambah dalam campuran beton akan mempengaruhi sifat mekanik dari beton, diantaranya adalah kuat desak dan modulus elastisitas.

Beton adalah suatu material yang merupakan campuran semen, agregat kasar, agregat halus dan air dengan proporsi tertentu. Beton akan semakin mengeras seiring dengan bertambahnya umur beton, dan akan mencapai kekuatan maksimal pada umur 28 hari. Beton dengan kualitas yang baik yaitu memiliki kuat desak yang tinggi dan *workability* yang tinggi pula.

Salah satu inovasi dari beton yang terus dikembangkan adalah beton mutu tinggi. Menurut SNI 03-6468-2000, beton mutu tinggi adalah beton yang memiliki kekuatan lebih besar sama dengan 41,4 MPa. Beton mutu tinggi banyak digunakan untuk bangunan bertingkat, jembatan dan pekerjaan-pekerjaan besar lainnya.

Kriteria beton mutu tinggi salah satunya tidak lepas dari penggunaan bahan tambah dalam campurannya yaitu bahan tambah kimia dan mineral. Salah satu bahan tambah kimia yang dapat digunakan adalah *superplasticizer*. Penggunaan *superplasticizer* ini bertujuan untuk mengurangi penggunaan air secara efektif.

Menurut ASTM C-618 material pozolan merupakan bahan dengan kandungan silika atau silika alumina dalam bentuk butiran halus yang memiliki sedikit bahkan tidak ada sifat semen. Akan tetapi bahan ini dapat bereaksi dengan Ca(OH)_2 untuk membentuk senyawa serupa semen. Salah satu material pozolan yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambah untuk beton mutu tinggi adalah *fly ash*.

Kekuatan sebagai salah satu kriteria utama beton mutu tinggi ditentukan oleh tiga hal. Menurut Mulyono (2006), tiga hal tersebut adalah agregat kasar, matriks semen-air atau pasta dan *interface Transition Zone* (ITZ). ITZ adalah daerah peralihan antara pasta dengan agregat sebesar 50 mili mikron.

Kuat desak beton adalah besarnya beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji beton hancur ketika dibebani dengan gaya desak tertentu. Rumus yang digunakan untuk menghitung pengujian nilai kuat desak beton yaitu :

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots [1]$$

Dengan:

$f'c$ = tegangan desak (MPa)

P = gaya desak (N)

A = luas penampang (mm^2)

Modulus elastisitas adalah perbandingan dari desakan yang diterima dengan perubahan bentuk per satuan panjang akibat dari desakan beban yang diterima (Murdock dan Brook, 1999). Untuk menghitung nilai modulus elastisitas pada penelitian ini digunakan beberapa persamaan, antara lain :

1. ASTM C469

$$Ec = \frac{0,4f'c - \sigma_1}{\epsilon_{0,4f'c} - \epsilon_1} \dots\dots\dots [2]$$

2. Eurocode 2-1992

$$Ec = \frac{0,4f'c}{\epsilon_{0,4f'c}} \dots\dots\dots [3]$$

3. ACI Committee 363-10

$$Ec = 3320\sqrt{f'c} + 6900 \dots\dots\dots [4]$$

4. SNI 2847-2013

$$Ec = 0,043w_c^{1,5} \sqrt{f'c} \text{ untuk } 1500 < w_c < 2500 \text{ kg/m}^3 \dots\dots\dots [5]$$

Dimana:

E_c = Modulus elastisitas beton (MPa)

$f'c$ = Kuat desak beton (MPa)

ϵ_1 = Regangan aksial saat 0,00005 (mm)

σ_1 = Tegangan yang berhubungan dengan ϵ_1

$\epsilon_{0,4f'c}$ = Regangan aksial saat 0,4 $f'c$

ϵ = Regangan aksial (mm)

w_c = Berat volume beton (kg/m^3)

Mikrostruktur beton dapat dianalisis menggunakan *Surface Area Analyzer* dimana dari hasil pengujian tersebut akan didapatkan hasil berupa nilai luas permukaan dan nilai volume pori. Nilai volume pori ini memiliki keterkaitan dengan porositas beton yang mempengaruhi sifat mekanik beton.

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental, dimana penelitian ini mengkaji dan menganalisa kuat desak dan modulus elastisitas beton mutu tinggi dengan bahan tambah *fly ash* menggunakan analisis mikrostruktur. Penelitian dilakukan urut dan terkontrol sesuai dengan urutan kegiatan secara sistematis menurut tahapan penelitian. Penelitian dilakukan pada umur beton ke 7, 14, 21 dan 28 hari. Kadar *fly ash* yang digunakan sebesar 65% merupakan hasil dari penelitian sebelumnya. Benda uji yang dipakai dalam penelitian ini adalah silinder berdiameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm.

Tabel 1. Kode dan Jumlah Benda Uji

No.	Umur Beton (Hari)	Kode Benda Uji dengan <i>Fly Ash</i>	Jumlah Benda Uji	Kode Benda Uji Tanpa <i>Fly Ash</i>	Jumlah Benda Uji
1	7	B _{HSC} FA 7-A	3	B _{HSC} N 7-A	3
		B _{HSC} FA 7-B		B _{HSC} N 7-B	
		B _{HSC} FA 7-C		B _{HSC} N 7-C	
2	14	B _{HSC} FA 14-A	3	B _{HSC} N 14-A	3
		B _{HSC} FA 14-B		B _{HSC} N 14-B	
		B _{HSC} FA 14-C		B _{HSC} N 14-C	
3	21	B _{HSC} FA 21-A	3	B _{HSC} N 21-A	3
		B _{HSC} FA 21-B		B _{HSC} N 21-B	
		B _{HSC} FA 21-C		B _{HSC} N 21-C	
4	28	B _{HSC} FA 28-A	3	B _{HSC} N 28-A	3
		B _{HSC} FA 28-B		B _{HSC} N 28-B	
		B _{HSC} FA 28-C		B _{HSC} N 28-C	
Total Benda Uji FA			12	Total Benda Uji N	12
Jumlah Total Benda Uji					24

Pengujian kuat desak dan modulus elastisitas dilakukan secara bersamaan dengan menggunakan alat *Universal Testing Machine* (UTM) dan dilakukan ketika beton berumur 7, 14, 21 dan 28 hari. Sementara itu pengujian SAA bertujuan untuk mengetahui luas permukaan volume pori pasta dari pecahan beton yang telah diuji kuat desak dan modulus elastisitasnya. Pengujian dilakukan dengan menggunakan alat *surface area analyzer*. Sampel yang digunakan berupa pasta dari pecahan sampel beton yang telah diuji kuat desak dan modulus elastisitasnya serta telah ditumbuk halus lolos ayakan no. 50 (0,3 mm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rancang Campur (*Mix Design*)

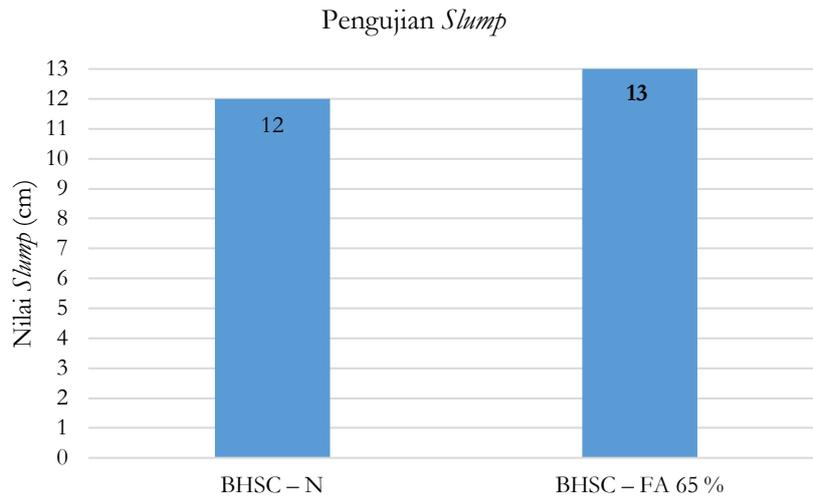
Komposisi *mix design* yang digunakan tiap 1m³ dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. *Mix Design* B_{HSC} N dan B_{HSC} FA 65% per 1m³

Kode	Ag. Kasar (Kg/m ³)	Ag. Halus (Kg/m ³)	Semen (Kg/m ³)	<i>Fly Ash</i> (Kg/m ³)	Air (lt/m ³)	<i>Admixture</i> (lt/m ³)
B _{HSC} N	991,98	780,67	550	0	123,75	7,15
B _{HSC} FA 65%	971,12	764,25	192,5	357,5	123,75	7,15

Hasil Pengujian *Slump*

Gambar 1. Memperlihatkan hasil pengujian *slump* untuk beton B_{HSC} N dan B_{HSC} FA



Gambar 1. Hasil Penguujian *Slump*

Hasil penguujian nilai *slump* menunjukkan bahwa beton tanpa bahan tambah (B_{HSC} N) memiliki nilai *slump* sebesar 12 cm. Sedangkan beton dengan bahan tambah *fly ash* dengan kadar 65% (B_{HSC} FA) memiliki nilai *slump* sebesar 13 cm. Nilai ini telah sesuai dengan nilai *slump* yang direncanakan sebelumnya yaitu sebesar 7,5 – 15 cm (Tjokrodimulyo 1992)

Hasil Penguujian Kuat Desak

Penguujian kuat desak dilakukan pada umur beton ke 7, 14, 21, dan 28 hari dengan hasil rekapitulasi penguujian tertera pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Hasil Penguujian Kuat Desak

Umur	Beton	f _c (MPa)	Persentase Kenaikan f _c (%)
7 Hari	B _{HSC} N 7	31,75	-22,78
	B _{HSC} FA 7	24,52	
14 Hari	B _{HSC} N 14	34,64	-14,02
	B _{HSC} FA 14	29,79	
21 Hari	B _{HSC} N 21	40,49	-15,96
	B _{HSC} FA 21	34,03	
28 Hari	B _{HSC} N 28	42,59	7,13
	B _{HSC} FA 28	45,63	

Berdasarkan Tabel 3. pada umur ke 7, 14 dan 21 hari beton dengan bahan tambah *fly ash* memiliki kuat desak yang lebih kecil dibandingkan dengan beton tanpa bahan tambah. Perkembangan kekuatan beton dengan bahan tambah *fly ash* cenderung lebih lama. Hal ini dikarenakan penambahan *fly ash* pada campuran beton mengurangi panas hidrasi sehingga mengakibatkan perkembangan kuat desak beton menjadi lebih lama (Irawan, 2012).

Beton dengan bahan tambah *fly ash* baru mengalami peningkatan kuat desak terhadap beton normal tanpa bahan tambah pada umur ke 28 hari. Persentase peningkatan kuat desak beton dengan bahan tambah *fly ash* terhadap beton normal tanpa bahan tambah pada umur 28 hari adalah sebesar 7,13%. Peningkatan kuat desak ini tentu mungkin terjadi karena sifat dari *fly ash* sendiri yang berperan sebagai *filler* atau pengisi ruang kosong akibat dari reaksi semen dan air. Secara kimiawi, *fly ash* akan bereaksi dengan senyawa yang dihasilkan dari hidrasi semen yang disebut sebagai reaksi pozolanik. Reaksi pozolanik terjadi setelah proses hidrasi semen telah berlangsung dan berperan mengeliminasi senyawa Ca(OH)₂ dan membentuk CSH sekunder yang berperan penting pada peningkatan kekuatan beton. Hal ini menyebabkan rongga-rongga pada daerah ITZ menjadi berkurang. Berikut ini merupakan uraian reaksi hidrasi semen dan reaksi pozolanik

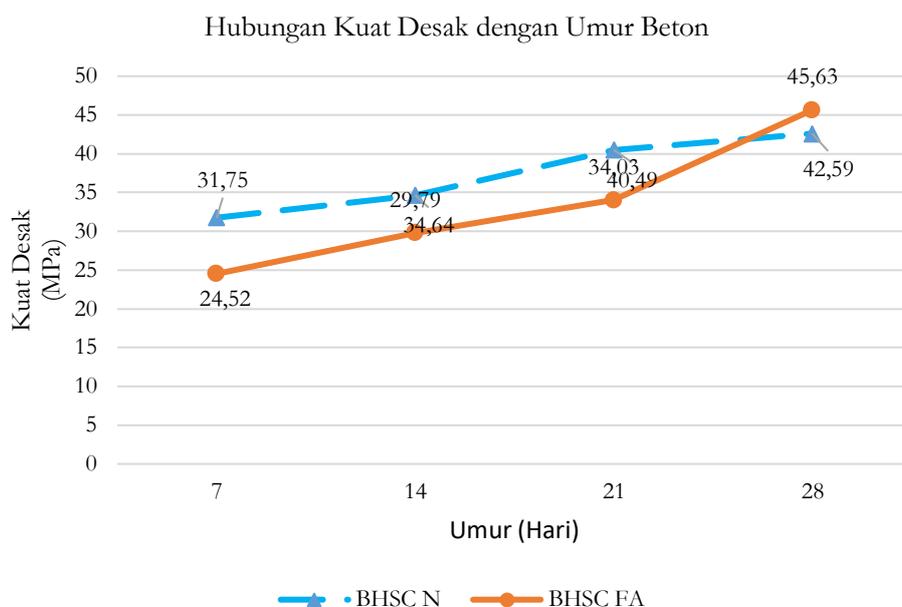
Reaksi Hidrasi Semen:



Reaksi Pozolanik:



Akan tetapi pengujian kuat desak beton ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai kuat desak beton sejalan dengan pertambahan umur beton. Hal ini berlaku baik untuk beton normal (B_{HSC N}) ataupun beton dengan bahan tambah (B_{HSC FA}). Hubungan antara kuat desak dengan umur beton dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Hubungan Kuat Desak dengan Umur Beton

Hasil Pengujian Modulus Elastisitas

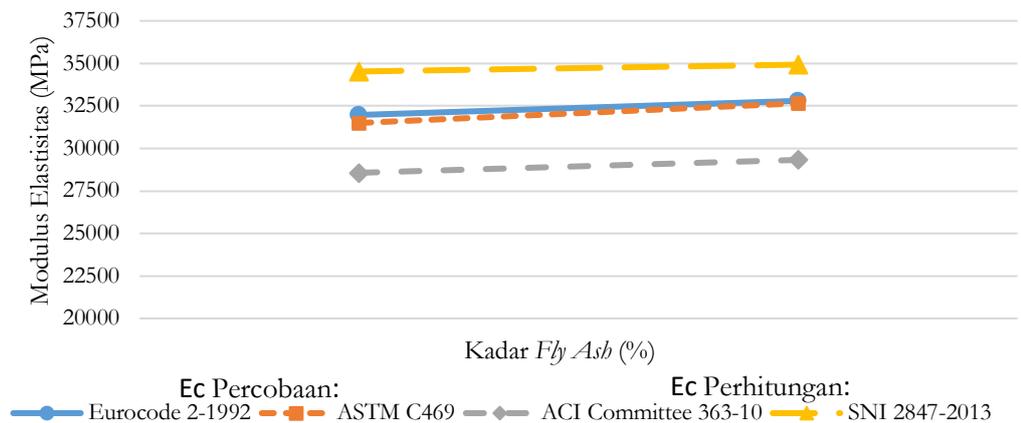
Pengujian modulus elastisitas beton dilakukan pada umur beton ke 7, 14, 21, dan 28 hari dengan rekapitulasi pengujian tertera pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Modulus Elastisitas Rata-rata

Umur	Beton	Ec Percobaan (MPa)		Ec Perhitungan (MPa)	
		Eurocode 2-1992	ASTM C469	ACI Committee 363-10	SNI 2847-2013
7 Hari	BHSC N 7	24760,17	25436,67	25607,00	29806,81
	BHSC FA 7	18758,53	19402,00	23335,54	25597,73
14 Hari	BHSC N 14	27944,10	28173,00	26439,82	31133,78
	BHSC FA 14	23297,95	24061,00	25017,08	28216,67
21 Hari	BHSC N 21	31794,25	29576,67	27828,15	33345,88
	BHSC FA 21	26684,70	26974,33	26263,17	30157,41
28 Hari	BHSC N 28	31968,00	31497,00	28567,25	34523,54
	BHSC FA 28	32796,45	32653,00	29325,14	34926,32

Berdasarkan Tabel 4, nilai modulus elastisitas percobaan dan perhitungan pada beton B_{HSC N} dan B_{HSC FA} nilainya semakin meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton. Sementara itu nilai modulus elastisitas beton hasil percobaan maupun perhitungan teoritis beton B_{HSC FA} pada umur ke 28 hari lebih tinggi dibandingkan dengan B_{HSC N}. Hal ini disebabkan karena penambahan *fly ash* pada campuran beton menyebabkan terjadinya reaksi pozolanik yang berperan membentuk senyawa penambah kekuatan pada beton (CSH). Penambahan *fly ash* membuat rongga rongga di antara pasta dan agregat sepanjang ITZ terisi, sehingga ketika beton menerima beban defleksi yang terjadi bernilai lebih kecil. Berikut disajikan grafik modulus elastisitas beton pada umur 28 hari pada Gambar 3.

Grafik Modulus Elastisitas Percobaan dan Perhitungan Umur 28 Hari



Gambar 3. Grafik Modulus Elastisitas Percobaan dan Perhitungan Umur 28 Hari

Hasil Pengujian *Surface Area Analysis* (SAA)

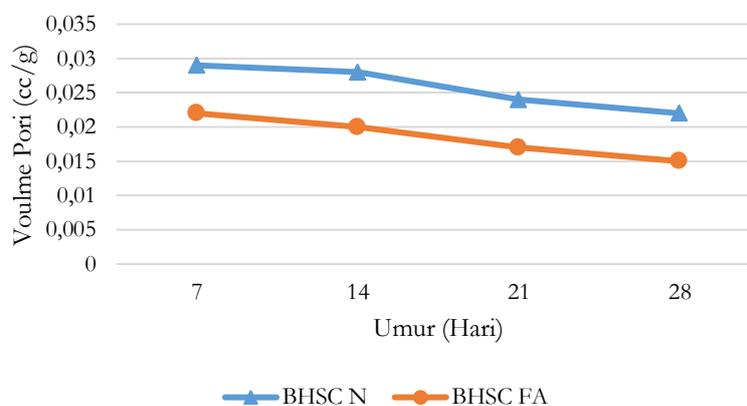
Pengujian *surface area analysis* dilakukan pada umur beton ke 7, 14, 21, dan 28 hari dengan rekapitulasi pengujian tertera pada tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Pengujian *Surface Area Analysis* (SAA)

Umur	Beton	Radius Pori (Å)	Volume Pori (cc/g)	Luas Permukaan (m ² /g)
7 Hari	B _{HSC} N 7	18,23	0,029	22,11
	B _{HSC} FA 7	18,14	0,022	14,95
14 Hari	B _{HSC} N 14	18,22	0,028	20,45
	B _{HSC} FA14	18,07	0,020	13,43
21 Hari	B _{HSC} N 21	18,17	0,024	15,96
	B _{HSC} FA 21	18,02	0,017	8,91
28 Hari	B _{HSC} N 28	18,13	0,022	11,97
	B _{HSC} FA 28	17,97	0,015	7,78

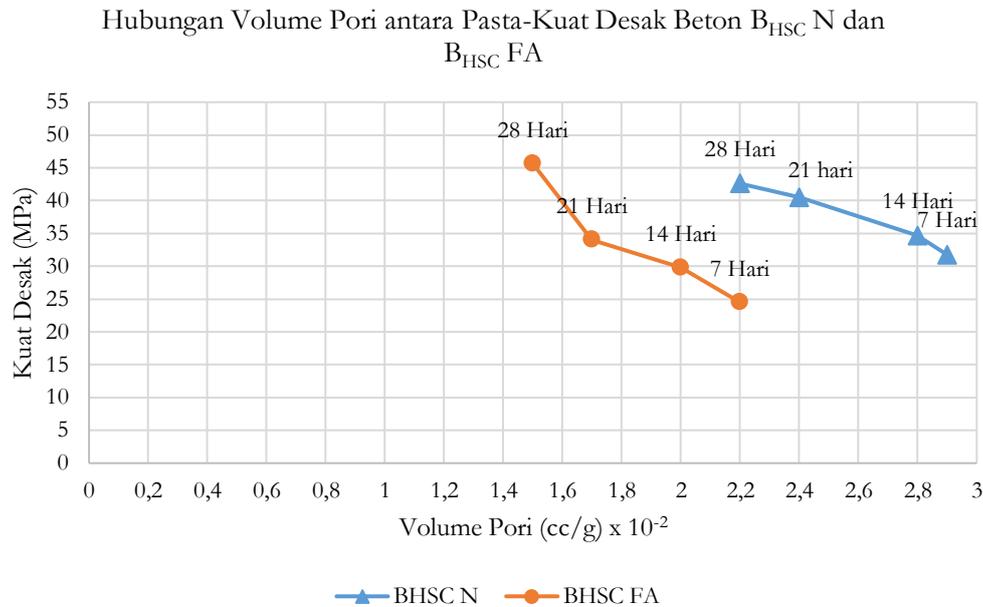
Berdasarkan Tabel 5. dapat disimpulkan bahwa hubungan antara luas permukaan dengan volume pori adalah berbanding lurus. Luas permukaan yang semakin menurun diikuti pula oleh volume pori yang semakin kecil seiring bertambahnya umur beton. Nilai luas permukaan yang didapat menyatakan luas adsorpsi material berpori yang berbentuk atom. Penurunan porositas dilatarbelakangi oleh proses hidrasi yang terus berlangsung seiring bertambahnya umur beton (Kurtis, 2013). Hal ini berlaku baik untuk beton B_{HSC} N maupun B_{HSC} FA dimana volume pori keduanya semakin kecil seiring bertambahnya umur. Perbandingan volume pori antara pasta beton B_{HSC} N dan B_{HSC} FA dapat dilihat pada Gambar 4.

Perbandingan Volume Pori antara Pasta Beton B_{HSC} N dan B_{HSC} FA

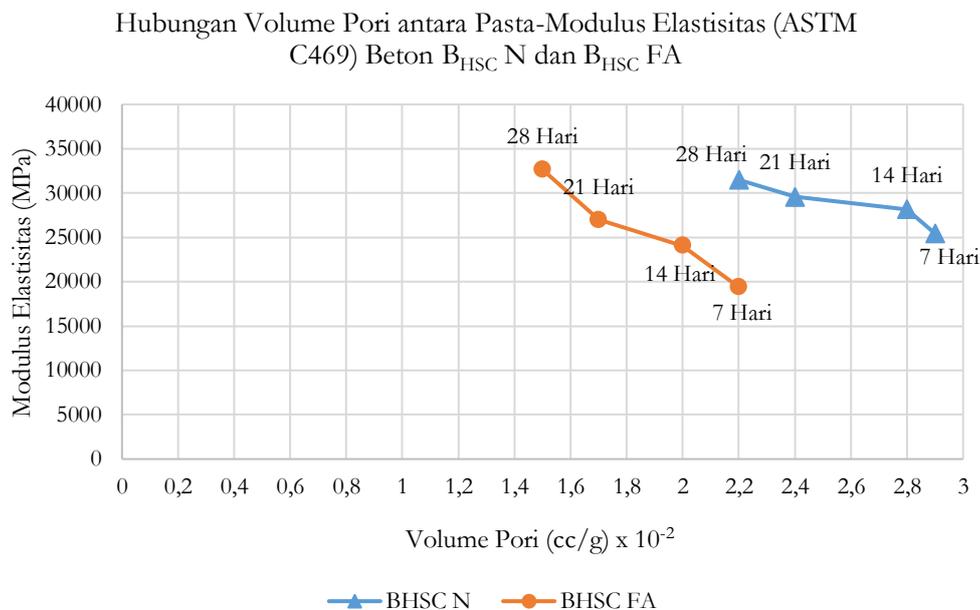


Gambar 4. Perbandingan Volume Pori antara Pasta Beton B_{HSC} N dan B_{HSC} FA

Berdasarkan Gambar 4. dapat disimpulkan bahwa volume pori beton B_{HSC} FA lebih kecil dibandingkan dengan beton B_{HSC} N pada semua umur. Hal ini karena *fly ash* memiliki ukuran butiran yang lebih kecil dibandingkan dengan semen. Penambahannya pada campuran sebesar 65% dari berat semen membuat *fly ash* lebih dominan dibandingkan semen itu sendiri. Akan tetapi, *fly ash* memiliki kecenderungan menghambat reaksi hidrasi semen dan merupakan senyawa yang kurang reaktif. Reaksi pozolanik yang menghasilkan senyawa CSH sekunder dan mengeliminasi Ca(OH)₂ berjalan dengan lambat. Hubungan volume pori terhadap nilai kuat desak dan modulus elastisitas beton dapat dilihat pada Gambar 5. dan Gambar 6.



Gambar 5. Hubungan Volume Pori Terhadap Kuat Desak Beton



Gambar 6. Hubungan Volume Pori Terhadap Modulus Elastisitas Beton

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Kuat desak beton dengan bahan tambah *fly ash* ($B_{HSC\ FA}$) pada hari ke 28 lebih tinggi dibandingkan beton tanpa bahan tambah ($B_{HSC\ N}$). Persentase kenaikan kuat desak rata-rata antara beton $B_{HSC\ FA}$ dan beton $B_{HSC\ N}$ adalah sebesar -22,78% pada umur 7 hari; -14,02% pada umur 14 hari; -15,96% pada umur 21 hari dan 7,13% pada umur 28 hari. Sementara itu nilai volume pori (cc/g) untuk beton $B_{HSC\ FA}$ lebih kecil dibandingkan $B_{HSC\ N}$ dengan persentase penurunan sebesar 24,14% pada umur 7 hari; 28,57% pada umur 14 hari; 29,17% pada umur 21 hari dan 31,82% pada umur 28 hari.
2. Modulus elastisitas dengan bahan tambah *fly ash* ($B_{HSC\ FA}$) pada hari ke 28 lebih tinggi dibandingkan beton tanpa bahan tambah ($B_{HSC\ N}$). Persentase kenaikan modulus elastisitas antara beton $B_{HSC\ FA}$ dan beton $B_{HSC\ N}$ adalah sebesar -8,87% pada umur 7 hari; -5,38% pada umur 14 hari; -5,62% pada umur 21 hari dan 2,65% pada umur 28 hari. Sementara itu nilai volume pori (cc/g) untuk beton $B_{HSC\ FA}$ lebih kecil dibandingkan $B_{HSC\ N}$ dengan persentase penurunan sebesar 24,14% pada umur 7 hari; 28,57% pada umur 14 hari; 29,17% pada umur 21 hari dan 31,82% pada umur 28 hari.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih penulis ucapkan kepada Laboratorium Bahan Universitas Sebelas Maret Surakarta yang telah menyediakan sarana dan prasarana yang digunakan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- American Society for Testing and Material. 1991. ASTM C 618 *Standard Test Method for Fly Ash and Row of calcoined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland cement Concrete*. USA.
- Badan Standarisasi Nasional. 2000. *Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu Terbang (SNI 03-6468-2000)*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta Pusat.
- Irawan, C., dkk. 2012. *Prediksi Kuat Tekan Beton Berbahan Campuran Fly Ash dengan Perawatan Uap Menggunakan Metode Kematangan*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya
- Kurtis, K. 2013. *Structure of the Hydrated Cement Paste*. Georgia Institute of Technology. Georgia.
- Mulyono, T. 2006. *Teknologi Beton*. Penerbit Andi Offset. Yogyakarta.
- Murdock, L. J., dan Brook, K. M. 1999. *Concrete Materials and Practice*. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Satria, R.G. 2018. *Pengaruh Kadar Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Pada High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete (HVFA-SCC) Benda Uji Silinder D 7,5 cm x 15 cm Usia 14, 28 dan 90 Hari*. Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Tjokrodimulyo, K. 1992. *Teknologi Beton*. Biro Penerbit Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.