

# KAJIAN KUAT DESAK DAN MODULUS ELASTISITAS BETON MUTU TINGGI DENGAN BAHAN TAMBAH *SILICA FUME* MENGGUNAKAN ANALISIS MIKROSTRUKTUR

Wibowo<sup>1)</sup>, Supardi<sup>2)</sup>, Markus Koko Nur Budianto<sup>3)</sup>

<sup>1),2)</sup> Pengajar Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

<sup>3)</sup> Mahasiswa Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Jl.

Ir. Sutami 36A, Kientingan Surakarta 57126; Telp 0271-634524.

Email: [markuskoko615@gmail.com](mailto:markuskoko615@gmail.com)

## Abstract

*The development of technology and the increasing demand for concrete make a challenge to create good quality concrete, one of which is high strength concrete. On the other hand, high strength concrete will require more binders, namely cement in the composition of the mixture. Therefore, further research is needed regarding the use of added ingredients (admixtures) as an alternative substitute for materials in the manufacture of high strength concrete. This research aims to examine how compressive strength and the elastic modulus of high strength concrete with the ingredients of adding silica fume at maximum levels (9%) using microstructure analysis at 7, 14, 21, and 28 days. The specimens used in this study were cylinders with a diameter of 7.5 cm and a height of 15 cm. The specimen testing in this study include the compressive strength and elastic modulus using Universal Testing Machine, and porosity tests using Surface Area Analyzer. The results showed that the increasing percentage of compressive strength of concrete with silica fume addition compared to concrete without any addition at 7, 14, 21 and 28 days is -6,614%, 0,577%, 13,739%, 17,539%. The increasing percentage of elastic modulus at 7, 14, 21 and 28 days is -3,415%, 0,274%, 6,651%, 8,39%. The percentage decrease in pore volume value at the ages of 7, 14, 21 and 28 days is 10,345%, 25%, 37,5%, 50%.*

**Keywords:** *high strength concrete, compressive strength, elastic modulus, porosity, silica fume.*

## Abstrak

Perkembangan teknologi serta kebutuhan beton yang terus meningkat memicu adanya tantangan untuk menciptakan kualitas beton yang baik, salah satunya adalah beton mutu tinggi. Namun di sisi lain, beton yang memiliki kualitas tinggi akan lebih memerlukan bahan pengikat (*binder*) yaitu semen dalam komposisi campurannya. Maka dari itu, perlu adanya penelitian-penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan bahan tambah (*admixtures*) sebagai alternatif pengganti material dalam pembuatan beton mutu tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji bagaimana kuat desak, modulus elastisitas beton mutu tinggi dengan bahan tambah *silica fume* pada kadar maksimum (9%) menggunakan analisis mikrostruktur pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari terhadap beton normal. Benda uji yang berupa silinder dengan diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Pengujian yang dilakukan pada penelitian ini meliputi uji kuat desak dan modulus elastisitas menggunakan *Universal Testing Machine*, serta uji porositas menggunakan alat *Surface Area Analyzer*. Hasil penelitian menunjukkan persentase peningkatan kuat desak beton dengan *silica fume* terhadap beton normal pada umur ke 7, 14, 21 dan 28 hari adalah -6,614%, 0,577%, 13,739%, 17,539%. Persentase peningkatan nilai modulus elastisitas pada umur ke 7, 14, 21 dan 28 hari adalah -3,415%, 0,274%, 6,651%, 8,398%. Persentase penurunan nilai volume pori pada umur 7, 14, 21 dan 28 hari adalah 10,345%, 25%, 37,5%, 50%.

**Kata Kunci:** beton mutu tinggi, kuat desak, modulus elastisitas, porositas, *silica fume*.

## PENDAHULUAN

Di era ini, dunia konstruksi mengalami kemajuan yang signifikan. Hal ini dibuktikan dengan pembangunan infrastruktur yang sedang digencarkan, seperti bangunan gedung, jalan raya, jembatan ataupun bendungan. Semua bangunan sipil tersebut sebagian besar menggunakan beton sebagai elemen pembentuk utama. Tercatat pada tahun 2016, jumlah pekerjaan beton nasional mencapai 137 juta ton dan diprediksi terus meningkat tiap tahunnya. Sejalan dengan perkembangan teknologi serta kebutuhan beton yang terus meningkat memicu adanya tantangan untuk menciptakan kualitas beton yang baik, salah satunya adalah beton mutu tinggi. Namun di sisi lain, beton yang memiliki kuat desak tinggi akan lebih memerlukan bahan pengikat (*binder*) yaitu semen dalam komposisi campurannya. Penggunaan semen yang terus meningkat ini akan mengakibatkan eksploitasi industri semen dan membawa dampak buruk terhadap lingkungan.

Berkaca pada permasalahan di atas, perlunya adanya penelitian-penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan bahan tambah (*admixtures*) sebagai alternatif pengganti material dalam pembuatan beton mutu tinggi. Bahan tambah sendiri ada dua jenis yaitu sebagai berikut: bahan tambah mineral (*mineral admixtures*) dan bahan tambah kimia (*chemical admixtures*). Pada penelitian digunakan *silica fume* sebagai bahan tambah mineral sebagai substitusi semen dalam pembuatan beton mutu tinggi. *Silica fume* merupakan zat *pozzolanic* yang mengandung lebih dari 85% senyawa kimia silika dan berukuran 1/100 diameter semen. Sementara itu, *chemical admixture* yang digunakan adalah jenis

*superplasticizer* (SP) sebagai polimer yang mampu menghasilkan *workability* yang diperlukan pada beton. Penggunaan SP dapat menjaga workabilitas beton dalam kondisi faktor air semen (FAS) yang rendah.

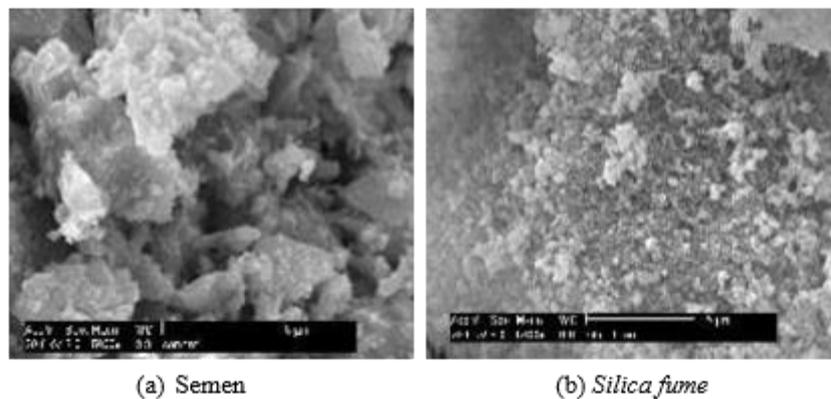
Tujuan dari penelitian ini untuk mengkaji bagaimana kuat desak, modulus elastisitas beton mutu tinggi dengan bahan tambah *silica fume* pada kadar maksimum (9%) menggunakan analisis mikrostruktur pada umur 7, 14, 21, dan 28 hari terhadap beton normal. Pengujian mikrostruktur yang dilakukan untuk mengetahui perbandingan nilai volume pori dari sampel pasta beton mutu tinggi dengan bahan tambah *silica fume* terhadap beton normal.

## TINJAUAN PUSTAKA

Beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidrolik yang lain, agregat halus, agregat kasar dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan (SNI 03-2847-2013). Dua karakteristik beton yaitu workabilitas (*fresh concrete*) dan kuat desak (*hardened concrete*).

Beton mutu tinggi atau *high strength concrete* (HSC) adalah beton yang memiliki kuat desak yang disyaratkan lebih besar atau sama dengan 41,4 MPa (SNI 03-6468-2000). Menurut Nugraha & Antoni (2007) ada 3 aspek penting yang mempengaruhi kekuatan beton mutu tinggi, yaitu: pasta semen, agregat, dan lekatan semen-agregat

*Silica fume* merupakan *pozzolanic* yang sangat baik, sebagian besar terdiri silika amorf yang dihasilkan dari danur tinggi sebagai produk sampingan unsur *silicon* atau *alloy* dari *ferrosilicon*. menurut ASTM C-1240. Berdasarkan sifat fisiknya, *silica fume* merupakan bahan yang sangat halus berbentuk bulat dan berdiameter 1/100 diameter semen atau sekitar 0,1 – 0,2  $\mu\text{m}$  (Kusumo, 2013) sehingga dapat menjadi *filler* (pengisi).



Gambar 1. Perbandingan Partikel Semen dengan *Silica Fume*

Kuat desak beton adalah nilai kekuatan atau beban yang mampu diterima oleh beton persatuan luasnya (ASTM C-42). Nilai kuat desak beton dapat dihitung dengan Persamaan [1].

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

Dimana :

$f_c$  = Kuat desak beton (MPa)

P = Gaya desak (N)

A = Luas permukaan benda uji ( $\text{mm}^2$ )

Modulus elastisitas adalah kemiringan kurva hubungan tegangan-regangan pada kondisi linier atau mendekati linier yang menghubungkan titik pusat dengan suatu harga tegangan sekitar 40%  $f_c'$  (Nawy, 2011). Pengujian modulus elastisitas bertujuan mengetahui sifat elastis suatu bahan yang berkaitan erat dengan pengujian kuat desak. Untuk menghitung modulus elastisitas ada beberapa persamaan yang digunakan, diantaranya:

Untuk menghitung modulus elastisitas ada beberapa persamaan yang digunakan, diantaranya:

1. ASTM C469

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

2. Eurocode 2-1992

$$E_c = \frac{0,4 f'_c}{\varepsilon_{0,4 f'_c}} \dots\dots\dots [3]$$

3. ACI Committee 363-10

$$E_c = 3320 \sqrt{f'_c} + 6900 \dots\dots\dots [4]$$

4. SNI 2847-2013

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

Dimana:

- $E_c$  = Modulus elastisitas beton (MPa)
- $f'_c$  = Kuat desak beton (MPa)
- $\varepsilon_1$  = Regangan aksial saat 0,00005 (mm/mm)
- $\sigma_1$  = Tegangan yang berhubungan dengan  $\varepsilon_1$
- $\varepsilon_{0,4 f'_c}$  = Regangan aksial saat 0,4  $f'_c$
- $w_c$  = Berat volume beton (kg/m<sup>3</sup>)

Mikrostruktur beton dapat dianalisis melalui pengujian *Surface Area Analysis* (SAA) yang bertujuan untuk mencari nilai luas permukaan, volume pori dan radius pori suatu material. Nilai volume pori ini berkaitan dengan tingkat porositas beton dan kepadatan beton.

## METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimental. Penelitian dilakukan secara bertahap mulai dari pengujian kuat desak beton, pengujian modulus elastisitas dan pengujian *surface area analysis* (SAA). Pengujian dilakukan pada umur beton ke-7, 14, 21 dan 28 hari. Benda uji yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Parameter yang harus diperhatikan dalam penelitian ini adalah nilai kuat desak rencana harus lebih dari 41,4 MPa, w/c 0,225, dan kadar penggunaan bahan tambah *silica fume* adalah sebesar 9% dari berat semen. Kode dan jumlah benda uji yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Kode dan Jumlah Benda Uji

No.	Umur Beton (Hari)	Kode Benda Uji dengan <i>Silica Fume</i>	Jumlah Benda Uji	Kode Benda Uji Tanpa <i>Silica Fume</i>	Jumlah Benda Uji
1	7	B <sub>HSC</sub> SF 7-A	3	B <sub>HSC</sub> N7-A	3
		B <sub>HSC</sub> SF 7-B		B <sub>HSC</sub> N7-B	
		B <sub>HSC</sub> SF 7-C		B <sub>HSC</sub> N 7-C	
2	14	B <sub>HSC</sub> SF 14-A	3	B <sub>HSC</sub> N14-A	3
		B <sub>HSC</sub> SF 14-B		B <sub>HSC</sub> N 14-B	
		B <sub>HSC</sub> SF 14-C		B <sub>HSC</sub> N 14-C	
3	21	B <sub>HSC</sub> SF 21-A	3	B <sub>HSC</sub> N21-A	3
		B <sub>HSC</sub> SF 21-B		B <sub>HSC</sub> N 21-B	
		B <sub>HSC</sub> SF 21-C		B <sub>HSC</sub> N 21-C	
4	28	B <sub>HSC</sub> SF 28-A	3	B <sub>HSC</sub> N28-A	3
		B <sub>HSC</sub> SF 28-B		B <sub>HSC</sub> N 28-B	
		B <sub>HSC</sub> SF 28-C		B <sub>HSC</sub> N 28-C	
<b>Total Benda Uji SF</b>			12	<b>Total Benda Uji N</b>	12
<b>Jumlah Total Benda Uji</b>				24	

Pengujian beton segar yang dilakukan adalah uji *slump* berdasarkan SNI 1972-2008. Kemudian, perawatan benda uji (*curing*) yang dilakukan dalam penelitian ini adalah dengan cara merendam benda uji yang telah berumur 1 hari (24 jam) ke dalam bak *curing*. Selanjutnya untuk beton keras dilakukan uji kuat desak dan modulus elastisitas dengan alat *universal testing machine* (UTM). Kemudian, pecahan sampel beton dari pengujian kuat desak diambil dan dihaluskan serta disaring lolos saringan no.50 (0,3mm). Kemudian, sampel serbuk tersebut dilakukan pengujian mikrostruktur (SAA).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Rancang Campur (*Mix Design*)

Rekapitulasi kebutuhan material penyusun beton normal tanpa bahan tambah (B<sub>HSC</sub> N) dan beton dengan bahan

tambah *silica fume* kadar 9% (B<sub>HSC</sub>SF) dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Rancang Campur Beton per 1 m<sup>3</sup>

Beton	Agregat Kasar (Kg/m <sup>3</sup> )	Agregat Halus (Kg/m <sup>3</sup> )	Semen (Kg/m <sup>3</sup> )	<i>Silica Fume</i> (lt/m <sup>3</sup> )	Air (lt/m <sup>3</sup> )	<i>Admixture</i> (lt/m <sup>3</sup> )
B <sub>HSC</sub> N	991,98	780,67	550	0	123,75	7,15
B <sub>HSC</sub> SF	982,88	773,51	500,50	49,50	123,75	7,15

### Hasil Pengujian *Slump*

Hasil pengujian *slump* untuk beton normal tanpa bahan tambah (B<sub>HSC</sub>N) dan beton dengan bahan tambah *silica fume* kadar 9% (B<sub>HSC</sub>SF) dapat dilihat pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Hasil Pengujian *Slump*

Beton	Nilai <i>Slump</i> (cm)
B <sub>HSC</sub> N	12
B <sub>HSC</sub> SF	10

Berdasarkan Tabel 3 nilai *slump* beton dengan bahan tambah *silica fume* (B<sub>HSC</sub>SF) lebih kecil daripada beton normal (B<sub>HSC</sub>N) dikarenakan luas permukaan *silica fume* lebih besar dibandingkan dengan semen (Ilham, 2013) sehingga membutuhkan air yang lebih banyak.

### Hasil Pengujian Kuat Desak

Rekapitulasi hasil pengujian kuat desak untuk beton normal tanpa bahan tambah (B<sub>HSC</sub>N) dan beton dengan bahan tambah *silica fume* kadar 9% (B<sub>HSC</sub>SF) dapat dilihat pada Tabel 4.

**Tabel 4.** Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Desak

Umur	Beton	Kuat Desak (MPa)	Persentase Kenaikan Kuat Desak (%)
7 Hari	B <sub>HSC</sub> N	31,75	-6,614
	B <sub>HSC</sub> SF	29,65	
14 Hari	B <sub>HSC</sub> N	34,64	0,577
	B <sub>HSC</sub> SF	34,84	
21 Hari	B <sub>HSC</sub> N	39,74	13,739
	B <sub>HSC</sub> SF	45,20	
28 Hari	B <sub>HSC</sub> N	42,59	17,539
	B <sub>HSC</sub> SF	50,06	

Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa peningkatan nilai kuat tekan beton akibat pengaruh penambahan *silica fume* baru terjadi pada umur ke 14 hari yaitu 34,64 MPa (B<sub>HSC</sub>N14) menjadi 34,84 MPa (B<sub>HSC</sub>SF14) atau sebesar 0,577%. Pada umur ke 21 hari meningkat sebesar 13,739% dari 39,74 MPa (B<sub>HSC</sub>N21) menjadi 45,20 MPa (B<sub>HSC</sub>SF21). Dan peningkatan paling besar terjadi pada umur ke 28 hari dari 42,59 MPa (B<sub>HSC</sub>N28) menjadi 50,06 MPa (B<sub>HSC</sub>SF28) atau sebesar 17,539%.

Peningkatan nilai kuat desak beton dengan penambahan *silica fume* dapat ditinjau dari 2 parameter sifat *silica fume* itu sendiri. Pertama ditinjau dari sifat fisiknya, *silica fume* memiliki ukuran butiran yang sangat kecil yaitu 100 kali lebih kecil dibandingkan semen (Kusumo, 2013) sehingga mampu berperan sebagai *filler* yang mengisi ruang kosong yang berisi air dan Ca(OH)<sub>2</sub> diantara agregat dan pasta semen. Sehingga rongga-rongga diantara agregat dan pasta semen atau daerah ITZ (*Interfacial Transition Zone*) akan berkurang jika dibandingkan dengan beton normal (Scrivener, 2004).

Kedua ditinjau dari sifat kimianya, *silica fume* merupakan bahan pozzolan yang mengandung senyawa SiO<sub>2</sub> sebesar 85,76% (dari hasil pengujian XRF), dimana senyawa ini akan bereaksi dengan batu kapur atau senyawa Ca(OH)<sub>2</sub> (Kalsium Hidroksida) yang merupakan hasil reaksi hidrasi semen. Hasil reaksi keduanya akan membentuk senyawa CSH sekunder sebagaimana yang dihasilkan pada proses hidrasi semen CSH primer.

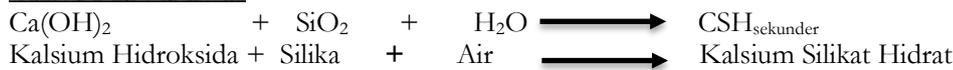
Untuk lebih jelasnya dapat dilihat di bawah ini:

#### Reaksi Hidrasi Semen:



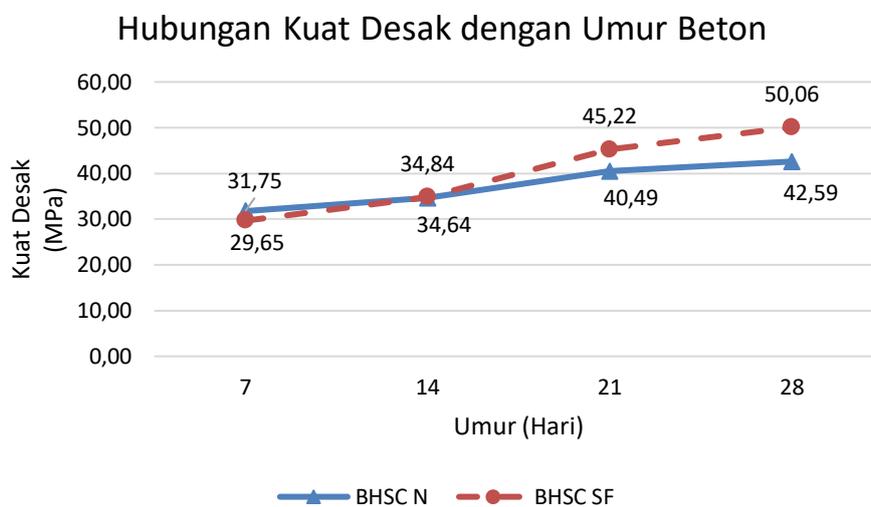
Senyawa Semen + Air  $\longrightarrow$  Kalsium Silikat Hidrat + Kalsium Hidroksida

**Reaksi Pozzolanic:**



Senyawa Kalsium Silikat Hidrat ini merupakan bahan pengikat dari pasta semen untuk mengikat agregat, sehingga dengan pertambahan CSH akan meningkat daya ikat pasta semen terhadap agregat. Reaksi ini tersebar merata pada seluruh tempat di dalam beton termasuk pada ruang-ruang kosong pada daerah ITZ, sehingga menambah kekuatan lekatan di daerah ITZ. Namun, reaksi pozzolanic tersebut terjadi setelah terbentuk senyawa  $\text{Ca(OH)}_2$  dari proses hidrasi semen.

Secara signifikan senyawa Kalsium Hidroksida akan terbentuk pada umur setelah 14 hari (Winnefeld, 2008). Sehingga pengaruh pozzolanic terhadap peningkatan kuat desak beton secara optimum setelah umur 14 hari. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik Hubungan Kuat Desak dengan Umur Beton

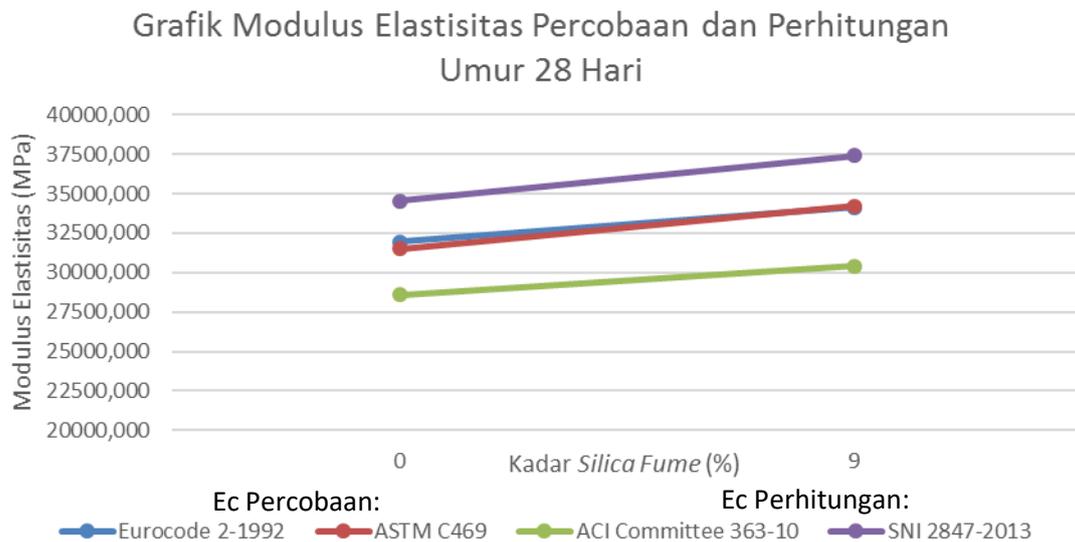
**Hasil Pengujian Modulus Elastisitas**

Perhitungan nilai modulus elastisitas percobaan dilakukan menggunakan Persamaan [2] dan [3] dengan cara membaca grafik tegangan regangan. Sementara itu, perhitungan nilai modulus elastisitas teoritis dilakukan menggunakan Persamaan [4] dan [5]. Rekapitulasi hasil perhitungan modulus elastisitas percobaan dan teoritis untuk beton normal tanpa bahan tambah ( $B_{HSC N}$ ) maupun beton dengan bahan tambah *silica fume* ( $B_{HSC SF}$ ) umur 7, 14, 21, dan 28 hari dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Modulus Elastisitas

Umur	Beton	Ec Percobaan (MPa)		Ec Perhitungan (MPa)	
		Eurocode 2-1992	ASTM C469	ACI Committee 363-10	SNI 2847-2013
7 Hari	$B_{HSC N}$	24760,169	25436,667	25606,998	29806,811
	$B_{HSC SF}$	23624,743	24003,667	24970,952	28788,827
14 Hari	$B_{HSC N}$	27944,102	28173,000	26439,816	31133,782
	$B_{HSC SF}$	30167,021	27961,667	26496,395	31219,009
21 Hari	$B_{HSC N}$	31794,251	29576,667	27828,147	33345,880
	$B_{HSC SF}$	32551,534	31486,000	29223,606	35563,728
28 Hari	$B_{HSC N}$	31968,003	31497,000	28567,253	34523,536
	$B_{HSC SF}$	34149,940	34208,000	30390,709	37423,040

Berdasarkan Tabel 5 di atas dapat dilihat bahwa nilai modulus elastisitas percobaan dan perhitungan beton B<sub>HSC</sub> N maupun B<sub>HSC</sub> SF mengalami *trend* kenaikan sejalan dengan bertambahnya umur beton. Hal ini disebabkan karena nilai modulus elastisitas berbanding lurus dengan mutu beton atau nilai kuat desak beton (Dipohusodo, 1996). Namun terjadi perbedaan antara hasil nilai modulus elastisitas percobaan dengan nilai modulus elastisitas perhitungan secara teoritis, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3 di bawah ini (diambil data umur ke 28 hari):



**Gambar 3.** Grafik Modulus Elastisitas Percoaban dan Teoritis Umur 28 Hari

### Hasil Pengujian *Surface Area Analysis* (SAA)

Pengujian *surface area analysis* (SAA) dilakukan untuk sampel beton umur 7, 14, 21 dan 28 hari. Pengujian dilakukan dengan alat *surface area analyzer*. Sampel yang diuji berbentuk serbuk pasta yang berasal dari pecahan sampel beton yang sebelumnya telah dilakukan uji kuat desak dan sudah ditumbuk hingga sampel lolos ayakan no. 50 (0,3 mm).

Rekapitulasi hasil pengujian *surface area analysis* untuk beton normal tanpa bahan tambah (B<sub>HSC</sub> N) maupun beton dengan bahan tambah *silica fume* (B<sub>HSC</sub> SF) umur 7, 14, 21, dan 28 hari dapat dilihat pada Tabel 6.

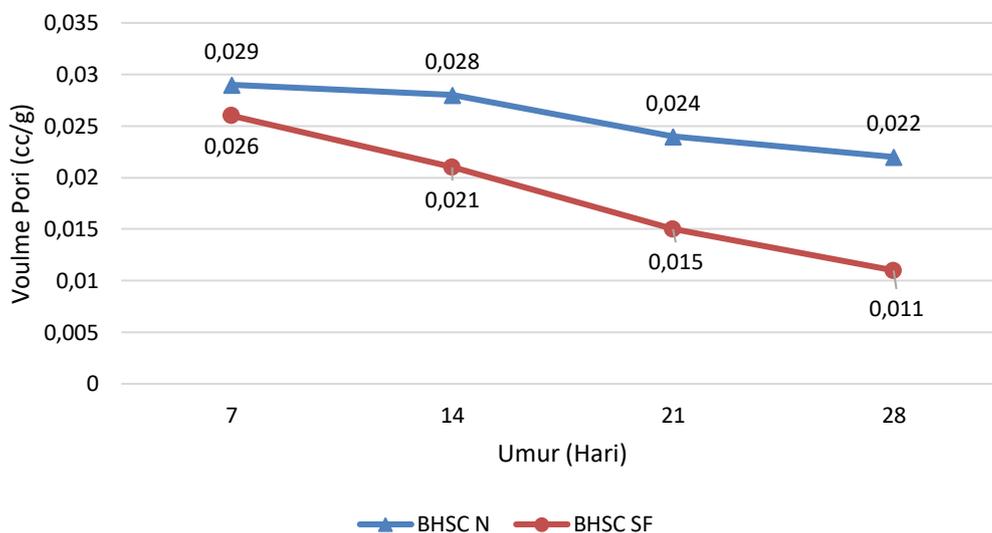
**Tabel 6.** Rekapitulasi Hasil Pengujian *Surface Area Analysis* (SAA)

Umur	Beton	Radius Pori (Å)	Volume Pori (cc/g)	Luas Permukaan (m <sup>2</sup> /g)
7 Hari	B <sub>HSC</sub> N	18,234	0,029	22,108
	B <sub>HSC</sub> SF	18,194	0,026	17,161
14 Hari	B <sub>HSC</sub> N	18,219	0,028	20,453
	B <sub>HSC</sub> SF	18,099	0,021	16,091
21 Hari	B <sub>HSC</sub> N	18,169	0,024	15,957
	B <sub>HSC</sub> SF	17,966	0,015	10,171
28 Hari	B <sub>HSC</sub> N	18,127	0,022	11,976
	B <sub>HSC</sub> SF	17,941	0,011	8,572

Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat hubungan antara luas permukaan dengan volume pori berbanding lurus, yaitu

turunnya luas permukaan juga diikuti oleh volume pori dengan semakin bertambahnya umur beton  $B_{HSC}$  N dan  $B_{HSC}$  SF. Luas permukaan yang menurun disebabkan oleh pori yang terbentuk relatif lebih besar. Sedangkan, penurunan tingkat porositas ini disebabkan oleh proses hidrasi semen yang akan terus berlangsung dan meningkat sejalan bertambahnya umur (Kurtis, 2013). Semakin banyaknya CSH yang terbentuk akan mengisi rongga-rongga antar partikel pasta. Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat juga bahwa ada perbedaan tingkat porositas antara sampel pasta beton  $B_{HSC}$  N dan  $B_{HSC}$  SF. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 4 di bawah ini:.

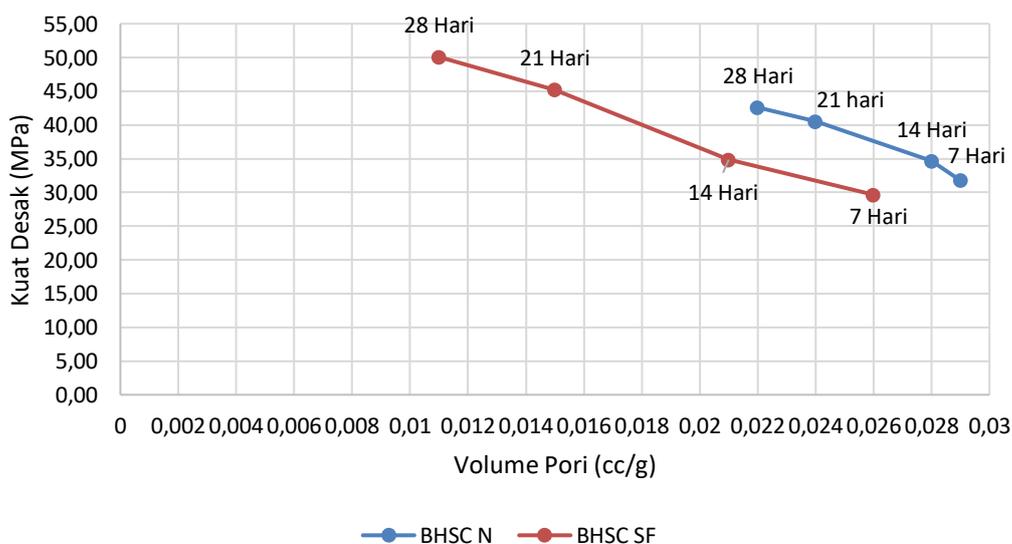
### Perbandingan Volume Pori antara Pasta Beton BHSC N dan BHSC SF



**Gambar 4.** Perbandingan Volume Pori antara Pasta Beton  $B_{HSC} N$  dan  $B_{HSC} AC$

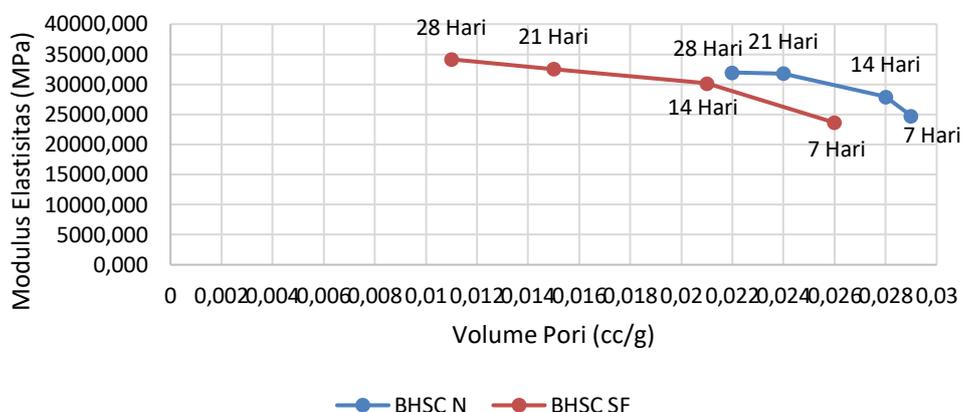
Berdasarkan Gambar 4 didapatkan bahwa tingkat porositas pasta beton  $B_{HSC} SF$  lebih kecil dibandingkan dengan beton  $B_{HSC} N$  di berbagai umur. Hal ini disebabkan, ukuran partikel *silica fume* lebih kecil daripada semen yaitu 100 kali lebih kecil dibandingkan semen (Kusumo, 2013), sehingga mampu mengisi rongga-rongga yang ada di dalam pasta. Selain itu, dengan adanya pengaruh pozzolanic (reaksi antara  $SiO_2$  dengan  $Ca(OH)_2$ ) akan semakin banyak terbentuk CSH (Kalsium Silikat Hidrat) sehingga tingkat porositasnya menurun (Scrivener, 2004). Dengan tingkat porositasnya yang lebih rendah, sehingga kerapatan akan semakin padat dan mempengaruhi sifat mekanik beton, yaitu kuat desak dan modulus elastisitasnya. Hubungan volume pori dengan kuat desak dan modulus elastisitas beton dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.

### Hubungan Volume Pori Pasta dengan Kuat Desak Beton BHSC N dan BHSC SF



**Gambar 5.** Hubungan Volume Pori dengan Kuat Desak Beton  $B_{HSC} N$  dan  $B_{HSC} SF$

## Hubungan Volume Pori Pasta dengan Modulus Elastisitas (Eurocode 2-1992) Beton BHSC N dan BHSC SF



**Gambar 6.** Hubungan Volume Pori dengan Modulus Elastisitas (Eurocode 2-1992) Beton BHSC N dan BHSCSF

### KESIMPULAN

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

1. Terjadi peningkatan kuat desak beton dengan *silica fume* (BHSC SF) terhadap beton normal (BHSC N) setelah umur ke 7 hari. Peningkatan kuat desak beton dengan *silica fume* (BHSC SF) terhadap beton normal (BHSC N) secara signifikan terjadi setelah umur ke 21 hari, yaitu sebesar 13,739%. Sedangkan peningkatan kuat desak beton dengan *silica fume* (BHSC SF) terhadap beton normal (BHSC N) paling besar terjadi pada umur ke 28 hari yaitu 17,539%. Hal ini diperkuat dengan pengujian *Surface Area Analysis* (SAA) dengan hasil volume pori sampel pasta beton dengan *silica fume* (BHSC SF) lebih kecil terhadap beton normal (BHSC N).
2. Modulus elastisitas beton normal (BHSC N) maupun beton dengan *silica fume* (BHSC SF) dari hasil percobaan dan perhitungan teoritis mengalami trend kenaikan dengan bertambahnya umur beton (bertambahnya kekuatan beton). Pada umur ke 28 hari nilai modulus elastisitas beton dengan *silica fume* (BHSC SF) lebih tinggi terhadap beton normal (BHSC N). Hal ini diperkuat dengan pengujian *Surface Area Analysis* (SAA) dengan hasil volume pori sampel pasta beton dengan *silica fume* (BHSC SF) lebih kecil terhadap beton normal (BHSC N).
3. Konversi kuat desak beton mutu tinggi tanpa bahan tambah (BHSC N) pada umur ke 7, 14, 21, dan 28 hari berturut-turut adalah 0,75; 0,81; 0,95; 1,00. Sementara itu, konversi kuat desak dengan beton mutu tinggi dengan bahan tambah *silica fume* (BHSC SF) pada umur ke 7, 14, 21, dan 28 hari berturut-turut adalah 0,59; 0,70; 0,90; 1,00. Apabila dibandingkan dengan konversi beton normal berdasarkan Peraturan Beton Bertulang Indonesia (PBTI 1971) pada umur ke 7, 14, 21, dan 28 hari berturut-turut adalah 0,60; 0,88; 0,95; 1,00

### UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih penulis ucapkan kepada Laboratorium Bahan Universitas Sebelas Maret yang telah menyediakan sarana dan prasarana dalam penelitian ini. Terimakasih juga kepada keluarga serta teman-teman yang telah mendoakan dan mendukung sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini tepat waktu.

### REFERENSI

- Badan Standarisasi Nasional. 2000. *Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu Terbang* (SNI 03-6468-2000). Badan Standarisasi Nasional. Jakarta Pusat.
- Badan Standarisasi Nasional. 2011. *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder* (SNI 1974-2011). Badan Standarisasi Nasional. Jakarta Pusat.
- Badan Standarisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung* (SNI 2847-2013). Badan Standarisasi Nasional. Jakarta Pusat.
- Wicaksono, Wahyu Satrio. 2018. *Pengaruh Kadar Silica Fume terhadap Kuat Tekan Pada High Strength Self Compacting Concrete (HSSCC)*. Jurnal Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret. Surakarta.