

KAJIAN MODULUS ELASTISITAS PADA BETON MUTU TINGGI MEMADAT MANDIRI DENGAN VARIASI PENAMBAHAN BAHAN METAKAOLIN

Wibowo¹⁾, Antonius Mediyanto²⁾, dan Putri Lathifah³⁾

¹⁾ Pengajar Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

²⁾ Pengajar Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

³⁾ Mahasiswa Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126; Telp. 0271-634524. Email: lalaputri97@gmail.com

Abstract

*High strength concrete with Metakaolin (MK) material addition is an innovation of the advancement in construction world having a very fast development. Metakaolin is used to substitute some of the cement total weight in which in this research the metakaolin amount used is MK 0% ; MK 12.5% ; MK 17.5% ; MK 22.5% ; and MK 27.5%. This research aimed to determine the effect of metakaolin as partial cement substitution material toward the elasticity modulus of high strength self-compacting concrete (HSSCC) in the concrete age of 28 days using cylindrical specimen with 75 mm diameter and 150 mm height. This research used experimental method. The concrete made by adding metakaolin didn't meet the requirements for self-compacting concrete (SCC), but it did for high strength concrete. **The highest elasticity modulus** was produced in the 12.5% amount of metakaolin from the cement weight. Then, the calculation which take ASTM C469 and Eurocode 2-1992 as a standard, showed that the **optimum** amount of metakaolin was 12.18% and 12.42% with the **optimum** elasticity modulus of 37594.73 MPa and 37368.04 MPa.*

Key words: Metakaolin, HSSCC, elasticity modulus.

Abstrak

Beton mutu tinggi dengan penambahan bahan Metakaolin (MK) merupakan inovasi untuk kemajuan dunia konstruksi yang memiliki perkembangan sangat pesat. Metakaolin digunakan untuk mengganti sebagian dari total berat semen yang dalam penelitian ini kadar metakaolin yang digunakan adalah MK 0% ; MK 12,5% ; MK 17,5% ; MK 22,5% ; dan MK 27,5%. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh variasi penambahan metakaolin dari berat semen terhadap modulus elastisitas beton *high strength self-compacting concrete* (HSSCC) pada usia beton 28 hari dengan benda uji silinder berukuran diameter 75 mm dan tinggi 150 mm. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah eksperimental. Hasil dari variasi penambahan bahan metakaolin dalam penelitian ini tidak memenuhi syarat *self-compacting concrete* (SCC), akan tetapi memenuhi syarat sebagai beton mutu tinggi atau *high strength*. **Modulus elastisitas maksimum** dihasilkan pada kadar 12,5% metakaolin. Kemudian, diperoleh kadar **optimum** hasil penghitungan berdasarkan ASTM C469 dan Eurocode 2-1992 yaitu 12,18% dan 12,42% dengan modulus elastisitas yang dihasilkan sebesar 37594,73 MPa dan 37368,04 MPa.

Kata kunci: Metakaolin, HSSCC, modulus elastisitas.

PENDAHULUAN

Perkembangan paling revolusioner dalam dunia konstruksi adalah beton memadat mandiri atau *self-compacting concrete* (SCC), beton yang mampu mengalir dengan beratnya sendiri mengisi keseluruhan bekisting bahkan dapat melewati tulangan padat yang memiliki jarak tertentu dan memadat tanpa diperlukan alat penggetar atau *vibrator* dengan mempertahankan homogenitas campuran. Penciptaan mutu beton yang lebih baik terus dilakukan, beton mutu tinggi memadat mandiri atau *high strength self-compacting concrete* (HSSCC) adalah beton SCC yang memiliki mutu tinggi dengan adanya penambahan *superplasticizer* (SP) sebagai polimer yang mampu menghasilkan *workability* yang diperlukan pada beton.

Metakaolin adalah bahan dasar alternatif sebagai hasil dari pemanasan kaolin pada suhu 500 °C – 900 °C yang digunakan untuk bahan pengganti semen. Penambahan metakaolin dalam campuran beton dapat meningkatkan kerapatan yang menghasilkan kualitas beton lebih bagus. Metakaolin memiliki ukuran partikel lebih kecil dari *silica fume* sehingga sebagai *pozzolan* metakaolin dapat mempercepat proses hidrasi dan mengurangi waktu *setting* beton. Penambahan metakaolin dalam penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan modulus elastisitas beton dengan disyaratkan kuat tekan beton yang dihasilkan tinggi, serta mengurangi porositas dan permeabilitas beton.

Modulus elastisitas dan kuat tekan beton merupakan parameter utama mutu beton. Semakin kuat struktur yang diinginkan maka semakin besar modulus elastisitas pada beton. Modulus elastisitas diperoleh dari pengujian benda uji atau *sample* beton berbentuk silinder dengan ukuran diameter 75 mm dan tinggi silinder 150 mm. Semakin tinggi nilai kuat tekan beton akan berbanding lurus dengan nilai modulus elastisitas beton yang juga semakin tinggi. Modulus elastisitas berkaitan erat dengan kekuatan bahan pada beton yang akan menerima beban, reaksi yang terjadi mengakibatkan perubahan tegangan dan regangan pada beton. Modulus elastisitas tinggi menunjukkan rasio tegangan terhadap regangan yang dihasilkan tinggi sehingga lendutan yang terjadi pada beton kecil.

LANDASAN TEORI

Beton berkualitas baik adalah beton yang tidak keropos/*porous*, kedap air dan menghasilkan kuat tekan tinggi. Keawetan beton menjadi rendah apabila tingkat permeabilitas dan porosititas yang tinggi sehingga beton tidak dapat digunakan sesuai dengan masa layannya. Oleh sebab itu diperlukan **metode baru dan teknologi** untuk pengecoran beton agar merata dan terjaga homogenitas campuran beton. Salah satu solusinya adalah dengan penggunaan **beton memadat mandiri (*self compacting concrete- SCC*)** (As'ad, 2012).

Beton merupakan bahan yang bersifat getas, nilai kuat tekan beton relatif lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tarik beton. **Kuat tarik** yang dimiliki **beton** hanya berkisar antara **9% - 15% dari kuat tekan beton**, karena itu sering kali dalam perencanaan kuat tarik beton dianggap sama dengan nol (Dipohusodo,1994). Beton mutu tinggi (*high strength concrete*) yang tercantum dalam SNI 03-6468-2000 didefinisikan sebagai beton yang mempunyai kuat tekan yang disyaratkan lebih besar sama dengan 41,4 MPa.

Penambahan variasi metakaolin pada campuran beton mutu tinggi memadat mandiri dapat meningkatkan kuat tekan beton, tetapi workabilitas pada beton menurun seiring dengan meningkatnya penambahan metakaolin pada campuran beton (Emir, 2017). Penggunaan proporsi faktor air semen yang semakin meningkat mengakibatkan kuat tekan beton semakin berkurang pada penambahan kadar metakaolin yang sama (Kasim, 2007). Disisi lain, penambahan metakaolin mempercepat proses hidrasi semen. Pada reaksi, CSH terhidrasi dan aluminium menggantikan silikon di rantai CSH sehingga didapatkan beton berkekuatan tinggi, menghasilkan porositas yang rendah pada beton, dan memiliki diameter pori kecil (Shen, 2017).

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode percobaan (eksperimental) dengan parameter yang dikaji yaitu *workability*, tegangan-regangan, dan modulus elastisitas beton. Penelitian dilakukan dengan pengujian *sample* berbentuk silinder yang berukuran diameter 75 mm dan tinggi 150 mm dengan umur beton 28 hari. Benda uji yaitu beton HSSCC dengan variasi penambahan kadar metakaolin yang berbeda-beda yaitu 0% ; 12,5% ; 17,5% ; 22,5% dan 27,5%. Benda uji dibuat tiga buah *sample* per variasi kadar metakaolin dijabarkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Jumlah kebutuhan benda uji

No.	Kadar Metakaolin	Kode Benda Uji	Umur Beton (hari)	Parameter Beton	Jumlah Benda Uji
1.	0%	HSSCC MK 0	28	Modulus Elastisitas	3
2.	12,5%	HSSCC MK 12,5	28	Modulus Elastisitas	3
3.	17,5%	HSSCC MK 17,5	28	Modulus Elastisitas	3
4.	22,5%	HSSCC MK 22,5	28	Modulus Elastisitas	3
5.	27,5%	HSSCC MK 27,5	28	Modulus Elastisitas	3
Total Benda Uji (<i>Sample</i>)					15

Mix Design atau Rancang Campur Adukan Beton

Rancang campur beton mutu tinggi memadat mandiri atau HSSCC dengan variasi penambahan bahan metakaolin penelitian ini berdasarkan EFNARC 2005. Mengacu pada penelitian sebelumnya, kadar *superplasticizer* Viscocrete 1003 yang digunakan 1,7% dari berat semen (kadar optimum pada penelitian sebelumnya) dengan faktor air semen yang digunakan 0,27. Rekapitulasi *mix design* atau rancang campur adukan beton diuraikan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Rekapitulasi *mix design* atau rancang campur adukan beton

Nama Benda Uji	Agregat		Sementitus		<i>Superplasticizer</i> (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
	Agregat Halus (Kg/m ³)	Agregat Kasar (Kg/m ³)	Semen (Kg/m ³)	Metakaolin (Kg/m ³)		
HSSCC MK 0	921,13	765,98	600,00	0,00	10,20	162,00
HSSCC MK 12,5	914,64	760,59	525,00	75,00	10,20	162,00
HSSCC MK 17,5	912,04	758,43	495,00	105,00	10,20	162,00
HSSCC MK 22,5	909,44	756,27	465,00	135,00	10,20	162,00
HSSCC MK 27,5	906,85	754,11	435,00	165,00	10,20	162,00

Persamaan yang Digunakan

Kuat tekan beton (*f_c*)

Pengujian kuat tekan beton dilakukan saat umur beton 28 hari dengan menggunakan alat *universal testing machine* (UTM) di Laboratorium material program studi teknik mesin Universitas Sebelas Maret, Surakarta. Hasil dari pembacaan mesin UTM adalah beban maksimum (Pmaks). Data beban maksimum tersebut dapat diolah dan menghasilkan nilai kuat tekan beton dengan menggunakan **Persamaan 1**.

$$f'c = \frac{P}{A} \dots\dots\dots(1)$$

dengan *f_c* = kuat tekan beton (N/mm²), P = beban desak maksimum (N), A = luas permukaan benda uji (mm²).

Modulus elastisitas beton (*E_c*)

Penghitungan modulus elastisitas menggunakan beberapa rumus empiris yang sudah diketahui. Hasil hitungan dibedakan menjadi 2 (dua) yaitu berdasarkan hasil eksperimen dan berdasarkan hasil prediksi. Berdasarkan hasil eksperimen dapat dihitung dengan **Persamaan 2** dan **Persamaan 3**.

Persamaan berdasarkan ASTM C469

$$Ec = \frac{0,4 f'c - \sigma_1}{\epsilon (0,4 f'c) - \epsilon_1} \dots\dots\dots(2)$$

dengan *E_c* = modulus elastisitas (MPa), *ε₁* = regangan aksial 50 x 10⁻⁶ (mm/mm), *σ₁* = tegangan yang berhubungan dengan *ε₁* (MPa), *f_c* = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa).

Persamaan Eurocode 2-1992

$$Ec = \frac{0,4 f'c}{\epsilon (0,4 f'c)}, [\text{interval } \sigma = 0 - \sigma = 0,4f'c] \dots\dots\dots(3)$$

dengan *E_c* = modulus elastisitas statik (MPa), *ε* = regangan aksial (mm/mm), *f_c* = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa).

Penghitungan modulus elastisitas berdasarkan hasil prediksi dapat dihitung dengan **Persamaan 4** sampai dengan **Persamaan 9**.

Persamaan berdasarkan ACI Committee 363-10

$$Ec = 3320 \sqrt{f'c} + 6900, [\text{High-strength concrete, } f'c \leq 83 \text{ MPa}] \dots\dots\dots(4)$$

dengan f'_c = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa).

Persamaan berdasarkan Eurocode 2-1992

$$E_c = 9500 (f'_c + 8)^{0,33} \dots\dots\dots(5)$$

dengan f'_c = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa).

Persamaan berdasarkan Kollmorgen

$$E_c = 11800 (f'_c)^{1/3,14}, [34 \leq f'_c \leq 207 \text{ MPa}] \dots\dots\dots(6)$$

dengan f'_c = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa).

Persamaan berdasarkan Norwegian Standard NS 3473

$$E_c = 9500 (f'_c)^{0,3}, [25 \leq f'_c \leq 85 \text{ MPa}] \dots\dots\dots(7)$$

dengan f'_c = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa).

Persamaan berdasarkan Norwegian Code

$$E_c = 9500 (f'_c)^{0,3} (w / 2400)^{1,5} \dots\dots\dots(8)$$

dengan f'_c = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa), w = berat volume beton (kg/m^3).

Persamaan berdasarkan SNI 2847-2013

$$E_c = 0,043 (w_c)^{1,5} (f'_c)^{0,5}, [1500 \leq w_c \leq 2500 \text{ kgf}/\text{m}^3] \dots\dots\dots(9)$$

dengan f'_c = kuat tekan beton uji silinder 28 hari (MPa), w_c = berat satuan beton (kgf/m^3).

Dokumentasi Pengujian



Gambar 1. Universal Testing Machine



Gambar 2. Pengujian sampel



Gambar 3. Sampel yang hancur

HASIL DAN PEMBAHASAN

Metakaolin

Penambahan metakaolin (MK) membantu menutupi rongga-rongga yang terbentuk akibat hidrasi semen dan dapat meningkatkan kepadatan yang mengakibatkan kuat tekan naik, dimana metakaolin yang merupakan pozzolan bereaksi dengan senyawa $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasil sampingan pada saat hidrasi semen yang menghasilkan C-S-H untuk perekat tambahan dalam campuran beton. Kandungan kimia yang terdapat pada metakaolin dapat diketahui dengan alat *X-Ray Fluorescence (XRF)* yang diuraikan dalam **Tabel 3**.

Tabel 3. Kandungan kimia metakaolin hasil uji *XRF*

Formula	Z	Concentration	Status	Line 1
SiO ₂	14	61,97 %	Fit spectrum	Si KA1/EQ20
Al ₂ O ₃	13	16,34 %	Fit spectrum	Al KA1/EQ20
Na ₂ O	11	7,92 %	Fit spectrum	Na KA1/EQ20
CaO	20	4,31 %	Fit spectrum	Ca KA1/EQ20
Fe ₂ O ₃	26	2,01 %	Fit spectrum	Fe KA1/EQ20
P ₂ O ₅	15	1,58 %	Fit spectrum	P KA1/EQ20
K ₂ O	19	1,58 %	Fit spectrum	K KA1/EQ20
MgO	12	1,22 %	Fit spectrum	Mg KA1/EQ20
SO ₃	16	1,14 %	Fit spectrum	S KA1/EQ20
Cl	17	1,00 %	Fit spectrum	Cl KA1/EQ20
TiO ₂	22	0,36 %	Fit spectrum	Ti KA1/EQ20
La ₂ O ₃	57	0,13 %	Fit spectrum	La KA1/EQ50
MnO	25	0,08 %	Fit spectrum	Mn KA1/EQ20
SrO	38	0,06 %	Fit spectrum	Sr KA1/EQ20

Pengujian Beton Segar (*Workability*) HSSCC Metakaolin**Tabel 4.** Hasil pengujian *workability* beton segar

Nama Benda Uji	<i>Flow Table Test</i>		<i>L-box Test</i>		<i>V-funnel Test</i>		<i>V-funnel T5menit</i>			
	drerata (mm)	Syarat	T500rerata (detik)	Syarat	h2/h1	Syarat	Waktu (detik)	Syarat	Waktu (detik)	Syarat
HSSCC MK 0	690,0		4,73		0,88		12,11		14,85	
HSSCC MK 12,5	555,0	650 - 800 EFNARC 2002	8,53	2 - 5 detik EFNARC 2002	0,82	0,8 - 1,0 EFNARC 2002	36,28	6 detik - 12 detik EFNARC 2002	40,22	0 detik - (+3) detik EFNARC 2002
HSSCC MK 17,5	502,5		16,75		0,52		51,32		60,39	
HSSCC MK 22,5	397,5		~		~		~		~	
HSSCC MK 27,5	340,0		~		~		~		~	

Tabel 4 menunjukkan bahwa semakin bertambahnya kadar metakaolin pada campuran beton mengakibatkan penurunan *workability* dapat dilihat dengan diameter sebaran beton yang semakin kecil menandakan viskositas campuran beton kental dan seiring bertambahnya kadar metakaolin waktu yang dibutuhkan untuk *fillingability*, *passingability*, dan *segregation resistance* campuran beton semakin lama dikarenakan butiran partikel metakaolin yang sangat kecil dapat menyerap lebih banyak air sehingga campuran beton dengan kadar metakaolin tinggi akan lebih menyerap banyak air dan lebih kental.

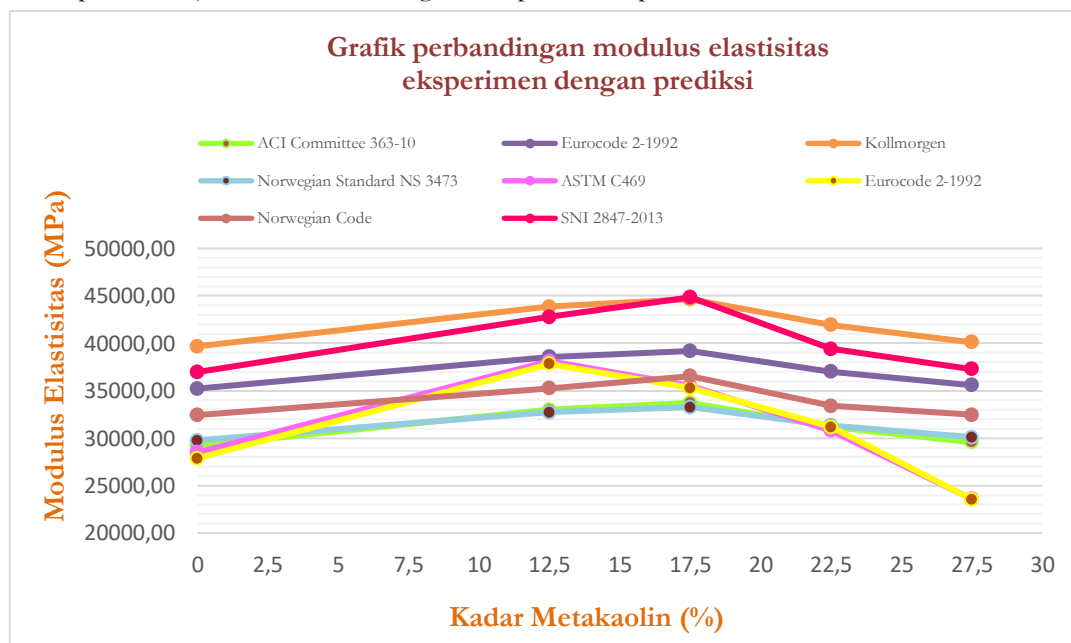
Analisis Modulus Elastisitas Beton HSSCC Metakaolin

Hasil modulus elastisitas yang tinggi memiliki arti kekuatan pada beton tersebut tinggi dengan dipengaruhi juga oleh bahan penyusun beton terutama pemilihan terhadap penggunaan agregat kasarnya. Penghitungan modulus elastisitas pada penelitian ini membandingkan antara modulus elastisitas hasil eksperimen dengan modulus elastisitas hasil prediksi. Dimana nilai modulus elastisitas beton berkisar antara 20.000 MPa sampai dengan 50.000 MPa.

Tabel 5. Rekapitulasi penghitungan modulus elastisitas hasil eksperimen dan hasil prediksi

No.	Parameter (Modulus Elastisitas)	Jenis Benda Uji				
		HSSCC MK 0	HSSCC MK 12,5	HSSCC MK 17,5	HSSCC MK 22,5	HSSCC MK 27,5
1.	ASTM C469	28498,51	38116,20	35509,87	30819,70	23595,53
2.	Eurocode 2-1992	27878,54	37811,60	35304,77	31171,64	23563,73
3.	ACI Committee 363-10	29186,06	32988,37	33720,95	31193,93	29581,95
4.	Eurocode 2-1992	35228,69	38555,61	39186,56	36996,22	35579,02
5.	Kollmorgen	39679,56	43867,45	44648,11	41920,80	40127,09
6.	Norwegian Standard NS 3473	29775,61	32727,20	33275,55	31357,35	30091,86
7.	Norwegian Code	32436,81	35254,80	36531,85	33412,54	32471,03
8.	SNI 2847-2013	36970,71	42796,03	44840,23	39419,86	37271,32

Hasil penghitungan modulus elastisitas beton silinder ukuran diameter 75 mm dan tinggi 150 mm umur 28 hari pada **Tabel 5** apabila disajikan dalam bentuk grafik dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Grafik perbandingan modulus elastisitas hasil eksperimen dengan hasil prediksi

Gambar 4 menunjukkan bahwa modulus elastisitas mengalami kenaikan dan penurunan. Akan tetapi, kenaikan tertinggi terdapat di kadar yang berbeda antara hasil eksperimen dengan hasil prediksi. Modulus elastisitas hasil eksperimen tertinggi pada kadar 12,5% metakaolin, dikarenakan tinjauan penghitungan menggunakan hasil kuat tekan sebesar $0,4f_c$ dan regangan hasil interpolasi ketika $0,4f_c$ dimana hasil regangan interpolasi kadar 12,5% lebih kecil yaitu sebesar 0,000653 daripada regangan interpolasi pada kadar 17,5% yaitu sebesar 0,000739. Kemudian, diperoleh kadar **optimum** hasil penghitungan berdasarkan ASTM C469 dan Eurocode 2-1992 yaitu 12,18% dan 12,42% dengan modulus elastisitas yang dihasilkan sebesar 37594,73 MPa dan 37368,04 MPa. Sementara, penghitungan modulus elastisitas prediksi berdasarkan hasil kuat tekan dan berat volume beton pada saat pengujian. Maka dari itu hasil modulus elastisitas prediksi tertinggi pada kadar 17,5% metakaolin dari berat semen sebanding dengan hasil kuat tekan.

SIMPULAN

Data hasil pengujian, analisis data, dan pembahasan terhadap hasil dari eksperimen penelitian beton mutu tinggi memadat mandiri dengan variasi penambahan bahan metakaolin, dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

Modulus elastisitas yang dihasilkan mengalami kenaikan dan penurunan akibat variasi penambahan metakaolin, penghitungan **modulus elastisitas eksperimen maksimum** dihasilkan pada kadar 12,5% metakaolin. Sementara, diperoleh kadar **optimum** hasil penghitungan berdasarkan ASTM C469 dan Eurocode 2-1992 yaitu 12,18% dan 12,42% dengan modulus elastisitas yang dihasilkan sebesar 37594,73 MPa dan 37368,04 MPa. Penurunan modulus elastisitas terjadi seiring dengan penurunan tegangan maksimum yang dihasilkan sementara regangan pada saat 0,4fc' yang dihasilkan relatif sama yaitu berkisar antara 0,0006-0,0007. **Modulus elastisitas hasil prediksi tertinggi** pada kadar 17,5% metakaolin dari berat semen dikarenakan penggunaan parameter untuk penghitungan modulus elastisitas prediksi berdasarkan hasil kuat tekan beton dan berat volume beton yang dihasilkan.

REKOMENDASI

1. Perlu penelitian lebih lanjut pada penggunaan kadar metakaolin dengan selisih antar kadar diperkecil. Kadar yang disarankan oleh penulis antara 17% sampai 25% metakaolin dari berat semen.
2. Referensi penggunaan jenis *superplasticizer* yang lain untuk dapat mempertahankan parameter *self compacting concrete*.
3. Perlu meningkatkan nilai faktor air semen agar mendapatkan *workability* campuran beton yang bagus dengan tetap memperhatikan syarat beton *self-compacting concrete* (SCC).
4. Penelitian lebih lanjut pada umur beton yang lebih lama dari 28 hari, seperti 56 hari dan 90 hari untuk melihat hasil reaksi pozzolanik bekerja dengan optimal pada umur beton yang tinggi.
5. Diusahakan untuk *checking* bekisting terhadap kemungkinan terjadi kemiringan pada hasil beton yang akan diuji, karena beton yang miring berpengaruh terhadap hasil pembacaan alat uji.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih pertama ditujukan kepada Allah SWT atas limpahan rahmat dan nikmatnya. Selanjutnya kepada Bapak Wibowo, S.T., D.E.A. dan Bapak Ir. Antonius Mediyanto, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah memberi arahan dan masukan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- Alsaman, Ali., dkk. 2017. "Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete". Construction and Building Materials 153, University of Arkansas, Department of Civil Engineering, USA.
- Anonim. 1990. "Standar Nasional Indonesia (SNI) 03 – 1974 – 1990 Metode Pengujian Kuat Tekan Beton". Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Anonim. 2000. "Standar Nasional Indonesia (SNI) 03 – 6468 – 2000 Tata Cara Perencanaan Campuran Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu Terbang". Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Anonim. 1993. ASTM C 618-94a. "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete".
- Anonim. 2002. EFNARC. "Specification and Guidelines For Self-Compacting Concrete".
- Anonim. 2005. EFNARC. "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Product and Use".
- Bilir, Turhan. 2016. "Investigation of performances of some empirical and composite models for predicting the modulus of elasticity of high strength concretes incorporating ground pumice and silica fume". Construction and Building Materials 127, Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Farabi Campus, Turkey.
- Emir A Dharmawan. 2017. "Kajian Pengaruh Variasi Komposisi Metakaolin terhadap Parameter Beton Memadat Mandiri dan Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi?". Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Galang Nur A Pamungkas. 2017. "Pengaruh Rasio Diameter / Tinggi Spesimen terhadap Hubungan Tegangan dan Regangan pada Beton High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete". Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Istimawan Dipohusodo. 1994. "Struktur Beton Bertulang". Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Patil, S.N., Gupta, A.K., dan Deshpande, S.S. 2012. "Metakaolin-Pozzolan Material for Cement in High Strength Concrete". Dept. of Civil Engg., Dr. JJMCOE, Jaysingpur, M.S. India.
- Sholihin As'ad. 2012. "Beton Memadat Mandiri". Harian JOGLOSEMAR. 12 Agustus 2012.