

KAJIAN KUAT TEKAN DAN MODULUS ELASTISITAS PADA BETON MEMADAT MANDIRI MUTU TINGGI DENGAN METAKAOLIN 12,5% SEBAGAI SEMEN DAN VARIASI STEEL SLAG SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT HALUS

Wibowo, Purwanto, Muhammad Nasirudin Syuja

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret Surakarta

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta, Jawa Tengah 57126

*Email: wibowotsipil87@ft.uns.ac.id

Abstract

Concrete as a construction material was chosen as the main material because the price is more economical, and the raw materials needed to manufacture are easy to find. SCC (Self Compacting Concrete) with the added material of 12.5% metakaolin and Steel Slag can improve the quality of the concrete so that it meets the requirements for High Strength Concrete with a compressive strength of more than 41.4 MPa. High strength Self-compacting concrete using 12.5% metakaolin added ingredients and variations of Steel Slag 0%, 15%, 17.5%, 20%, 22.5%, and 25%. The research was carried out to obtain the characteristics of fresh concrete to qualify as SCC concrete. After fulfilling the requirements as SCC concrete, then testing the compressive strength and modulus of elasticity of the concrete. Based on the research results, the maximum compressive strength values were obtained and a graph of the stress-strain relationship for the calculation of the modulus of elasticity. Concrete with added Steel Slag qualifies as SCC concrete with the maximum compressive strength and modulus of elasticity at Steel Slag 22.5% with a tensile strength value of 62.17 MPa and a modulus of elasticity of 31179.2 MPa using the standard Eurocode 2-1992 calculation.

Keywords: High Strength Concrete, Metakaolin, Steel Slag.

Abstrak

Beton sebagai bahan konstruksi dipilih sebagai bahan utama karena harga yang lebih ekonomis dan bahan baku yang dibutuhkan dalam pembuatan mudah untuk ditemukan. Beton memadat mandiri (Self Compacting Concrete) dengan bahan tambah metakaolin 12,5% dan Steel Slag mampu meningkatkan mutu beton sehingga memenuhi standar syarat Beton Mutu Tinggi dengan kuat tekan lebih dari 41,4 MPa. Beton mutu tinggi memadat mandiri menggunakan bahan tambah metakaolin 12,5% dan variasi Steel Slag 0%, 15%, 17,5%, 20%, 22,5% dan 25%. Penelitian dilaksanakan untuk mendapatkan karakteristik dari beton segar untuk memenuhi syarat sebagai beton SCC. Setelah memenuhi syarat sebagai beton SCC, selanjutnya dilakukan pengujian terhadap nilai kuat tekan dan modulus elastisitas beton. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan nilai kuat tekan maksimum dan grafik hubungan tegangan-regangan untuk perhitungan modulus elastisitas. Beton dengan tambahan Steel Slag memenuhi syarat sebagai beton SCC dengan kuat tekan dan modulus elastisitas beton maksimum terjadi pada kadar Steel Slag 22,5% dengan nilai kuat tekan sebesar 62,17 MPa dan modulus elastisitas sebesar 31179,2 MPa menggunakan standar perhitungan Eurocode 2-1992.

Kata Kunci : Beton mutu tinggi, Metakaolin, Steel Slag.

PENDAHULUAN

Saat ini Pemerintah sedang gencar melakukan pembangunan infrastruktur di berbagai kawasan dengan harapan dapat memompa laju pertumbuhan ekonomi di Indonesia. Dalam pembangunan infrastruktur saat ini masih menjadikan beton sebagai pilihan utama dalam bahan bakunya. Beton dipilih karena dinilai lebih mudah dalam pekerjaannya. Selain itu beton memiliki harga yang terbilang ekonomis dan bahan baku yang dibutuhkan dalam pembuatan mudah dicari (pasir, semen, kerikil, air). Beton juga memiliki kuat tekan yang tinggi sehingga dapat menahan beban berat, namun beton juga memiliki kelemahan dalam kuat tariknya.

Untuk mengatasi permasalahan kuat tarik tersebut, penggunaan baja tulangan memang menjadi salah satu cara yang bisa dilakukan. Namun dengan adanya kebutuhan tulangan yang semakin bertambah, beton agar kesulitan untuk mengalir ke seluruh bagian sehingga menyebabkan terperangkapnya banyak udara dan pemadatan yang kurang sempurna. Hal ini lantas mengurangi kualitas dan mutu beton. Oleh karena itu diperlukan adanya inovasi beton yang memiliki kemampuan mengalir yang lebih baik dan dapat memadat sendiri yaitu Beton Memadat Sendiri (Self Compacting Concrete). Beton memadat mandiri atau sering disebut SCC merupakan beton yang dapat memadat mandiri tanpa bantuan vibrator, dan memiliki kemampuan mengalir yang baik tanpa mengalami segregasi (Irawan, 2014). Pengembangan dari SCC yaitu dengan penambahan kuat tekannya yang disebut beton mutu tinggi memadat

mandiri (*High Strength Self Compacting Concrete*). Beton jenis ini memiliki kuat tekan yang lebih tinggi dibanding beton biasa. Dengan penggunaan beton mutu tinggi maka dimensi struktur akan menjadi lebih ramping (Sumajouw, 2014). Bahan tambah kimia sangat dibutuhkan untuk meningkatkan *workability* mengingat beton mutu tinggi cenderung lebih sulit dalam proses pengerjaannya. Dalam penelitian ini, penulis menggunakan bahan tambah mineral berupa metakaolin dan *steel slag* sebagai bahan pengganti agregat.

Metakaolin digunakan sebagai bahan pengganti semen sebagai pozzolan, berfungsi sebagai pengisi pori dan meningkatkan kerapatan dari beton mutu tinggi. Kandungan SiO₂ pada metakaolin akan bereaksi dengan Ca(OH)₂ yang terbentuk dari reaksi semen dengan air yang akan meningkatkan daya ikat beton. Penambahan *steel slag* digunakan untuk menambah kuat tekan beton. *Steel slag* adalah limbah yang dihasilkan dari hasil sisa produk peleburan baja dalam tanur. Memiliki bentuk yang tidak beraturan, berat jenis yang lebih besar daripada batu alam, memiliki ketahanan terhadap abrasi serta karakteristik kekerasan yang bagus (Iwardoyo, 2016), maka *steel slag* layak digunakan sebagai pengganti agregat.

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan *Steel Slag* terhadap nilai kuat tekan dan modulus elastisitas pada beton memadat mandiri mutu tinggi dengan metakaolin 12,5%. Pengujian yang dilakukan terdiri dari uji beton segar sebagai syarat beton SCC meliputi *filling ability*, *passing ability*, dan *segregation resistance*. Dilanjutkan dengan pengujian beton keras yaitu uji kuat tekan dan modulus elastisitas beton. Dengan dilakukannya penelitian ini, akan didapatkan kadar *Steel Slag* optimum pada nilai kuat tekan dan modulus elastisitas beton.

Beton merupakan suatu campuran dari beberapa material dengan bahan utama terdiri dari semen, agregat, air dan bahan tambah. Karena beton merupakan suatu komposit, maka kualitas beton bergantung pada komposisi dan susunan material pembentuknya (Tjokrodimulyo, 2007). Menurut SNI 03-6468-2000, beton mutu tinggi didefinisikan sebagai beton dengan kuat tekan yang disyaratkan lebih sama dengan 41,4 MPa. Pengujian untuk mendapatkan nilai tersebut dilakukan setelah beton berumur 28 hari atau 56 hari.

Self compacting concrete merupakan beton dengan kemampuan dapat memadat mandiri tanpa bantuan alat penggetar. Beton memadat mandiri mengandalkan proporsi agregat, ukuran agregat, dan *admixture superplasticizer* untuk mencapai kekentalan yang diinginkan. Beton mampu mengalir ke seluruh cetakan tanpa terjadi segregasi. SCC memiliki *flowability* yang tinggi untuk memenuhi bekisting, dan mencapai kepadatan tertingginya sendiri (EFNARC, 2005).

Metakaolin adalah limbah hasil kalsinasi dari kaolin pada suhu 450°C -900°C. Berukuran lebih kecil dari *steel slag* dengan kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ yang tinggi. Kedua unsur tersebut merupakan unsur utama penyusun semen, sehingga metakaolin dapat digunakan sebagai pengganti semen (Sambowo, 2002). Dengan menambahkan metakaolin, (CaOH)₂ yang terbentuk dari reaksi semen dengan air yang akan meningkatkan daya ikat beton. Kaolin yang digunakan berasal dari Desa Semin, Gunung Kidul, Yogyakarta, yang selanjutnya dipanaskan pada suhu 700°C selama 24 jam.

Slag atau limbah padat berasal dari hasil residu pembakaran tanur tinggi (*blast furnace*), yang diproduksi dari pabrik baja modern (*modern steel plant*). Menurut Paul, N, Antoni (2007), *slag* adalah bahan sisa dari pengecoran besi (*pig iron*), yaitu prosesnya menggunakan dapur (*furnance*) dan bahan bakar yang digunakan berasal dari udara yang ditiup (*blast*). *Slag* terbentuk dari campuran aluminium, kalsium, silikon dan fosfor yang bereaksi pada suhu 1600°C dan membentuk suatu cairan. Apabila cairan yang didinginkan akan terjadi kristal, dapat digunakan sebagai campuran semen dan digunakan sebagai substitusi agregat. Adapun faktor untuk menentukan sifat penyemenan atau *cementious* dari *slag* yaitu komposisi kimia, konsentrasi alkali dan reaksi terhadap sistem, kandungan kaca dalam *slag*, kehalusan, dan temperatur yang ditimbulkan saat proses hidrasi. Berdasarkan ASTM (1994), *slag* adalah produk non-metal yang merupakan material berbentuk mulai dari halus hingga berupa balok besar dari hasil pembakaran yang didinginkan. Apabila cairan didinginkan secara perlahan akan terjadi kristal tak bermanfaat yang dapat digunakan sebagai campuran semen dan digunakan sebagai pengganti agregat. *Slag* digiling hingga halus dan dapat digunakan sebagai pengganti agregat halus pada pembuatan beton.

Kuat tekan beton merupakan kemampuan suatu beton untuk menerima gaya desak per satuan luas. Kuat tekan beton berhubungan erat dengan umur beton itu sendiri. Kekuatan beton akan naik dengan cepat sampai umur 28

hari, kemudian akan tetap meningkat namun dengan intensitas yang lebih rendah. Hal ini dikarenakan beton mencapai kekuatan 100% pada umur 28 hari (Dipuhusodo, 1994).

Menurut Murdock dan Brook, modulus elastisitas merupakan tolak ukur dari elastisitas suatu bahan yang merupakan perbandingan dari desakan dengan perubahan bentuk persatuan panjang. Pengujian modulus elastisitas ini dilakukan bersamaan dengan uji kuat tekan menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) yang telah dilengkapi dengan dial pengukur regangan vertikal.

METODE

Pengujian beton segar dilaksanakan menggunakan tiga metode yaitu *Slump Flow Test*, *L-Box*, dan *V-funnel*. Pengujian beton segar dengan *slump flow test* dilakukan untuk mengetahui tingkat kemudahan pengerjaan (*workability*) dan parameter *filling ability* pada beton *High Strength Self Compacting Concrete*. Pengujian *L-box* dilaksanakan untuk mengetahui parameter *passing ability* beton *self compacting concrete* (SCC). Alat uji *L-Box* berupa *box* tersambung membentuk huruf L yang terdapat katup dan tulangan besi di antaranya. Pengujian *V-funnel* T-5 menit dilaksanakan untuk mengetahui parameter *segregation resistance self-compacting concrete* (SCC). Alat uji yaitu sebuah plat baja yang memiliki rongga berbentuk huruf V dan terdapat katup di bagian bawah. Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm disimpan dalam suhu antara 16 – 17°C selama 48 jam, terlindungi sinar matahari. Pembuatan benda uji menggunakan alat *concrete mixer* dengan komposisi bahan campuran beton sesuai dengan *mix design*. Setelah itu campuran beton dikeluarkan dari alat *concrete mixer* dan dilakukan pengujian *slump flow*. Lalu dimasukkan ke dalam bekisting berbentuk silinder. Kemudian melepas bekisting setelah 24 jam. Setelah pelepasan bekisting, dilanjutkan dengan proses *curing*. Benda uji direndam di dalam ember selama 7 hari sebelum dilakukan uji kuat tekan dan modulus elastisitas pada saat umur beton 28 hari. Benda uji yang digunakan tercantum pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Benda uji kuat tekan dan modulus elastisitas

No.	Kadar Metakaolin (%)	Kadar Steel Slag (%)	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Jumlah Benda Uji
12,5		0	HSSCC-SS0%-KTMOE	28	5
		15	HSSCC-SS15%- KTMOE	28	5
		17,5	HSSCC-SS17,5%- KTMOE	28	5
		20	HSSCC-SS20%- KTMOE	28	5
		22,5	HSSCC-SS22,5%- KTMOE	28	5
		25	HSSCC-SS25%- KTMOE	28	5
Jumlah					30

Mix Design

Mix Design beton metakaolin HSSCC dengan variasi komposisi *Steel Slag* dibuat berdasarkan EFNARC 2005. FAS yang digunakan adalah 0,25 dan kadar optimum *superplasticizer Sika Viscocrete 1003* sebanyak 1,5% dari berat binder. Agregat kasar yang digunakan adalah kerikil dengan ukuran maksimum 12,5 mm dan minimum 6,3 mm. Rekapitulasi *mix design* beton dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rekapitulasi *mix design* beton memadat mandiri mutu tinggi

Nama Benda Uji	Agregat			Cementitious		SP (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
	Agg. Halus (Kg/m ³)	Agg. Kasar (Kg/m ³)	Steel Slag (Kg/m ³)	Semen (Kg/m ³)	MK (Kg/m ³)		
HSSCC -SS 0%	929,5	790,0	0	525	75	9	150
HSSCC -SS 15%	790,1	790,0	139,4	525	75	9	150
HSSCC -SS 17,5%	766,8	790,0	162,7	525	75	9	150
HSSCC -SS 20%	743,6	790,0	185,9	525	75	9	150
HSSCC -SS 22,5%	720,4	790,0	209,1	525	75	9	150
HSSCC -SS 25%	697,1	790,0	232,4	525	75	9	150

Pengujian Beton Segar

Pengujian beton segar dilaksanakan untuk mengetahui parameter beton memadat mandiri yaitu *filling ability*, *passing ability*, dan *segregation resistance*. Pengujian dilakukan berdasarkan EFNARC 2005 meliputi *slump flow test*, *V-funnel test*, dan *L-Box test*.

Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan beton didapatkan dengan menggunakan *Compression Testing Machine (CTM)*. Pengujian ini dilakukan pada saat beton berumur 28 hari. Hasil dari pengujian ini akan mengetahui nilai maksimum beton ketika menerima gaya luar. Dalam pengujian kali ini, pengujian kuat tekan beton dilakukan berdasarkan SNI 2847-2019. Rumus yang digunakan pada perhitungan uji kuat tekan beton dapat dilihat pada Persamaan 1 berikut :

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

keterangan:

$f'c$ = tegangan desak (MPa)

P = gaya desak (N)

A = luas penampang (mm²)

Pengujian Modulus Elastisitas

Pengujian ini dilakukan menggunakan *Compression Testing Machine (CTM)* bersamaan dengan pengujian kuat tekan. Benda uji diberikan *dial* tambahan sebagai penanda perubahan panjang (ΔL) yang dicatat setiap kenaikan tekanan sebesar 20 kN. Kemudian data hasil pengujian diperlihatkan dalam bentuk grafik hubungan tegangan-regangan yang selanjutnya digunakan dalam perhitungan modulus elastisitas. Perhitungan modulus elastisitas menggunakan persamaan menurut Eurocode 2-1992 dan ASTM C469. Sebagai perbandingan, digunakan persamaan menurut ACI Committee 363 dan SNI 2847-2019.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Beton Segar

Hasil pengujian beton segar berdasarkan EFNARC 2005 pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3 – Tabel 5.

Tabel 3. Hasil Pengujian *Slump Flow*

Nama Benda Uji	Pengujian <i>Slump Flow</i>							
	T _{500 rerata} (detik)	Syarat	Ket.	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _{rerata} (mm)	Syarat	Ket.
HSSCC-SS 0%	4,7		OK	655	675	670		OK
HSSCC-SS 15%	4,4		OK	700	710	705		OK
HSSCC-SS 17,5%	4,1	2-5 detik	OK	715	725	720	650 - 800 mm	OK
HSSCC-SS 20%	3,9	EFNARC 2005	OK	720	730	725	EFNARC 2005	OK
HSSCC-SS 22,5%	3,7		OK	725	745	735		OK
HSSCC-SS 25%	3,4		OK	755	735	745		OK

Tabel 4. Hasil Pengujian *L-Box*

Nama Benda Uji	h ₂ (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ /h ₁	Syarat	Kesimpulan
HSSCC-SS 0%	9	11	0,82		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 15%	8	9	0,89		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 17,5%	9	10	0,90	0,81 – 1	Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 20%	10	11	0,91	EFNARC	Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 22,5%	10	10	1,00	C 2005	Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 25%	9	9	1,00		Memenuhi Syarat

Tabel 5. Hasil Pengujian *V-Funnel* 9-25 detik

Nama Benda Uji	<i>V-Funnel</i> (detik)	Syarat	Kesimpulan
HSSCC-SS 0%	11,5	6 – 25 EFNARC 2005	Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 15%	9,5		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 17,5%	9		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 20%	8		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 22,5%	7,5		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 25%	6,5		Memenuhi Syarat

Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton dilakukan di Laboratorium Bahan Fakultas Teknik UNS dengan menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) pada saat beton berusia 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan beton dapat dilihat pada Tabel 6.

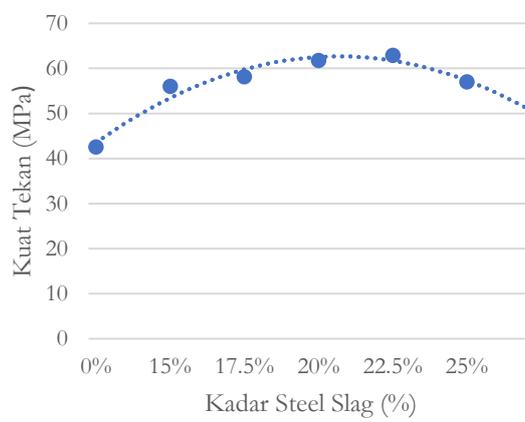
Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Benda Uji	Kode	P_{max} (kN)	$f'c$ (MPa)	$f'c$ rata-rata (MPa)
HSSCC - SS0% - KTMOE	A	755	42,75	42,52
	B	735	41,61	
	C	740	41,90	
	D	775	43,88	
	E	750	42,46	
HSSCC – SS15% - KTMOE	A	980	55,48	55,99
	B	985	55,77	
	C	990	56,05	
	D	1005	56,90	
	E	985	55,77	
HSSCC – SS17,5% - KTMOE	A	1030	58,32	58,09
	B	1010	57,18	
	C	1030	58,32	
	D	1015	57,47	
	E	1045	59,16	
HSSCC – SS20% - KTMOE	A	1075	60,86	61,17
	B	1115	63,13	
	C	1100	62,28	
	D	1105	62,56	
	E	1055	59,73	
HSSCC – SS22,5% - KTMOE	A	1125	63,69	62,17
	B	1090	61,71	
	C	1085	61,43	
	D	1090	63,71	
	E	1100	62,28	
HSSCC – SS25% - KTMOE	A	1005	56,90	57,01
	B	1015	57,47	
	C	1000	56,62	
	D	1010	57,18	
	E	1005	56,90	

Berdasarkan data di atas, beton dengan penambahan *Steel Slag* telah memenuhi syarat SNI 03-6468-2000 beton mutu tinggi dengan kuat tekan beton lebih dari 41,4 MPa. Perbedaan nilai kuat tekan disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 1. Sementara perbandingan beton dengan *Steel Slag* terhadap beton tanpa *Steel Slag* dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Pengaruh *steel slag* terhadap nilai kuat tekan beton mutu tinggi memadat mandiri dengan metakaolin 12,5%

Benda Uji	f'c rata-rata (MPa)	Persentase Perubahan f'c Rata-rata terhadap SS0% (%)
HSSCC – SS 0% - KTMOE	42,52	0,00
HSSCC – SS 15% - KTMOE	55,99	31,69
HSSCC – SS 17,5% - KTMOE	58,09	36,62
HSSCC – SS 20% - KTMOE	61,71	45,14
HSSCC – SS 22,5% - KTMOE	62,17	46,21
HSSCC – SS 25% - KTMOE	57,01	34,09

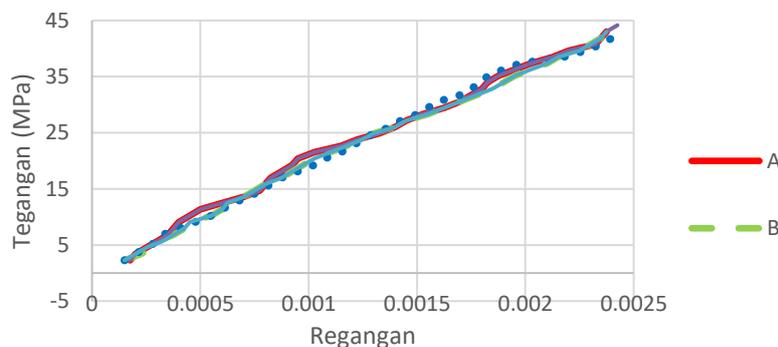


Gambar 1. Grafik hubungan kuat tekan dengan kadar *Steel Slag*

Penambahan variasi *Steel Slag* memberikan peningkatan pada kuat tekan beton mutu tinggi memadat mandiri dengan metakaolin 12,5% dengan kenaikan kuat tekan beton paling tinggi terjadi pada kadar *Steel Slag* 22,5% sebesar 62,17 MPa. Berdasarkan hasil analisa pada Gambar 1, terbentuk garis regresi polinomial yang kemudian dapat ditentukan kadar *Steel Slag* optimum yaitu pada kadar *Steel Slag* 22,45% sebesar 59,68 MPa.

Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Data hasil pengujian Pengujian modulus elastisitas dilakukan bersamaan dengan pengujian nilai kuat tekan yaitu dengan alat CTM. Benda uji diberikan dial tambahan sebagai penanda perubahan panjang (ΔL) yang dicatat setiap kenaikan tekanan sebesar 20 kN. Kemudian data hasil pengujian menghasilkan grafik hubungan tegangan-regangan. Berikut grafik hubungan tegangan-regangan beton mutu tinggi memadat mandiri dengan metakaolin 12,5% dengan berbagai variasi *Steel Slag* pada Gambar 2.



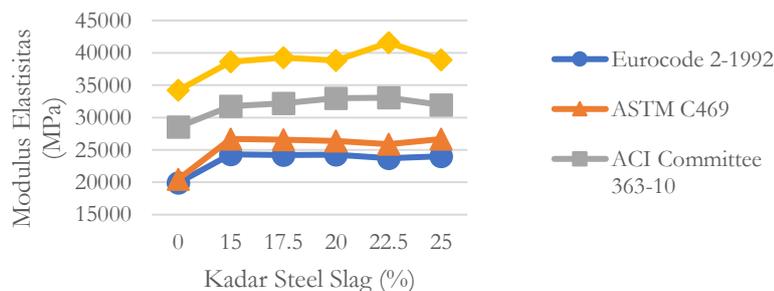
Gambar 2. Grafik hubungan tegangan-regangan beton *Steel Slag* 0%

Dengan grafik tersebut dapat dihitung nilai modulus elastisitas percobaan menggunakan standar Eurocode 2-1992 dan ASTM C469. Kemudian nilai tersebut dibandingkan dengan nilai modulus elastisitas secara teoritis berdasarkan ACI Committe 363 dan SNI 2847-2019. Untuk rekapitulasi perhitungan modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi perhitungan modulus elastisitas

Benda uji	Kode	Ec Percobaan		Ec Teoritis	
		Eurocode 2-1992	ASTM C469	ACI Committe 363	SNI 2847-2019
HSSCC - SS0% - KTMOE	A	20600,45	20691,00	28606,28	34301,93
	B	19525,44	20778,00	28316,85	33844,55
	C	19374,18	19515,00	28389,58	33959,47
	D	20648,60	20823,00	28891,90	34753,29
	E	19411,59	20527,00	28534,29	34188,15
HSSCC – SS15% - KTMOE	A	23485,62	25943,82	31630,05	38473,77
	B	24050,83	26046,87	31693,06	38571,79
	C	25477,71	28017,70	31755,91	38669,56
	D	23165,48	25721,78	31943,50	38961,41
	E	25421,25	27786,92	31693,06	38571,79
HSSCC – SS17,5% - KTMOE	A	23210,21	25718,97	32253,07	39347,56
	B	23702,92	26011,57	32005,72	38963,67
	C	25493,18	27831,17	32253,07	39347,56
	D	23044,16	25794,67	32067,79	39060,00
	E	25654,16	27557,52	32437,02	39633,04
HSSCC – SS20% - KTMOE	A	25968,39	27696,96	32800,98	38573,22
	B	23166,27	25338,99	33278,46	39284,31
	C	23173,52	25616,13	33100,43	39019,17
	D	23224,84	25543,75	33159,90	39107,75
	E	25760,03	27751,99	32558,91	38212,71
HSSCC – SS22,5% - KTMOE	A	23161,55	25315,64	33396,48	42101,76
	B	23275,93	25533,18	33219,25	41820,14
	C	26070,91	27667,82	32921,17	41346,51
	D	23326,78	25363,30	33278,46	41914,22
	E	23163,90	25361,37	33337,54	42008,10
HSSCC – SS25% - KTMOE	A	23165,48	25900,98	31943,50	38867,11
	B	23636,56	26004,74	32067,79	39060,00
	C	25163,17	27984,14	31881,13	38770,30
	D	23104,36	25801,60	32005,72	38963,67
	E	25149,27	27649,33	31943,50	38867,11

Dari hasil perhitungan, nilai modulus elastisitas terjadi kenaikan seiring dengan kenaikan pada nilai kuat tekan beton. Nilai modulus elastisitas meningkat mulai dari variasi *Steel Slag* 15% hingga variasi *Steel Slag* 22,5%. Kemudian nilai modulus elastisitas turun kembali. Namun terdapat perbedaan antara nilai modulus elastisitas percobaan dan teoritis. Grafik perbedaan modulus elastisitas percobaan dan perhitungan dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik perbedaan modulus elastisitas percobaan dan perhitungan

Terdapat perbedaan hasil dari perhitungan percobaan dan teoritis, hal ini disebabkan karena beberapa faktor yaitu:

1. Pembacaan *dial* regangan yang kurang halus karena dicatat pada setiap kenaikan tekanan sebesar 20 kN secara manual.
2. Keterbatasan dalam membaca interpolasi pada grafik tegangan-regangan.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan dan perhitungan data yang telah dilakukan pada beton memadat mandiri mutu tinggi dengan substitusi metakaolin 12,5% sebagai semen dan variasi *steel slag* sebagai agregat halus untuk benda uji silinder dengan tinggi 30 cm dan diameter 15 cm, dengan pengujian saat beton berusia 28 hari, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Substitusi metakaolin 12,5% sebagai semen dan variasi *steel slag* sebagai substitusi agregat halus menambah nilai kuat tekan beton sehingga memenuhi syarat beton mutu tinggi menurut SNI 03- 6468-2000, dengan kuat tekan lebih besar dari 41,4 MPa.
2. Substitusi metakaolin 12,5% sebagai semen dan variasi *steel slag* sebagai substitusi agregat halus meningkatkan nilai kuat tekan beton. Nilai kuat tekan beton mutu tinggi memadat mandiri dengan metakaolin 12,5% dengan variasi 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; 25% masing-masing adalah 42,52 MPa; 55,99 MPa; 58,09 MPa; 61,71 MPa; 62,17 MPa dan 57,01 MPa. Nilai kuat tekan optimum terjadi pada saat kadar *steel slag* 22,45% dengan nilai kuat tekan sebesar 59,68 MPa.
3. Substitusi metakaolin 12,5% sebagai semen dan variasi *steel slag* sebagai substitusi agregat halus meningkatkan nilai modulus elastisitas beton. Nilai modulus elastisitas beton memadat mandiri mutu tinggi dengan metakaolin 12,5% dengan variasi 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; 25% masing-masing adalah 25784,0 MPa; 30354,1 MPa; 30569,4MPa; 30616,8 MPa; 31179,2 MPa dan 30396,5 MPa. Nilai modulus elastisitas optimum terjadi pada saat kadar *steel slag* 21,12% dengan nilai modulus elastisitas sebesar 30779,0057 MPa.

REKOMENDASI

Penelitian ini dapat ditindaklanjuti tetapi perlu dilakukan beberapa koreksi agar penelitian selanjutnya mendapat hasil lebih baik. Adapun saran untuk penelitian selanjutnya yaitu:

1. Mengatur pembacaan perubahan panjang pada dial setiap kenaikan tekanan kurang dari 20 kN. Hal itu dilakukan agar mendapatkan grafik tegangan-regangan yang lebih halus.
2. Melakukan pengujian pada umur beton selain 28 hari, seperti 56, 72, dan 90 hari untuk melihat pengaruh penambahan *steel slag* terhadap kuat tekan dan modulus elastisitas beton..

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih penulis tujukan kepada Allah SWT atas segala rahmat serta hidayahnya. Penulis ucapkan terimakasih juga kepada pihak-pihak terkait yang tidak dapat penulis sebut satu-persatu atas bantuan dan menularkan semangat untuk menyelesaikan penelitian ini.

REFERENSI

- American Concrete Institute, 2010, "ACI Committee 363 : Report On High-Strength Concrete".
- American Standard Testing and Material, 1994, "ASTM C469 : Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression".
- Dipuhusodo, I., 1994, "Struktur Beton Bertulang", Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- EFNARC, 2005, "Specification and Guidelines for Self Compacting Concrete".
- Eurocode 2, 1992, "Design of Concrete Structures, European Committee for Standardization".
- Irawan, I., 2014, "Pengaruh Silica Fume Terhadap Beton Mutu Tinggi Self Compacting Concrete".
- Iwardoyo, J., 2016, "Studi Pemanfaatan Steel Slag Sebagai Bahan Bangunan SABODAM".
- Paul, N. A., 2007, "Teknologi Beton", Penerbit ANDI. Yogyakarta.
- Sambowo, K. A., 2002, "Engineering Properties and Durability Performance of Metakaolin and Metakaolin PFA Concrete".
- Standar Nasional Indonesia, 2000, "SNI 03-6468-2000 : Tata Cara Perencanaan Beton Berkekuatan Tinggi dengan Semen Portland dan Abu Terbang".
- Standar Nasional Indonesia, 2019, "SNI 2847-2019 : Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional".
- Sumajouw, M. D., 2014, "Pengujian Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi".

Tjokrodimulyo, K., 2007, "Teknologi Beton", Biro Penerbit Teknik Sipil Keluarga Mahasiswa Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.