

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

Wibowo^{1)*}, Endah Safitri²⁾, Bernadeta Azaria Manalu³⁾

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

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

Jl. Ir. Sutami 36A, Kentingan Surakarta 57126; Telp. (0271) 634524, Fax 662118

Email : wibowotsipil87@ft.uns.ac.id

Abstract

The infrastructure development can not be denied that will grow rapidly, so innovation is needed in the production of concrete with high strength and less time needed for the production. The need for cement is very much considered to increasing of development, to reduce the damage to the environment, metakaolin is used as a substitution for cement. Metakaolin has the character of pozzolan which can be reacted. In this research, steel slag is used as a substitution for fine aggregate. The variations of steel slag in this research are 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; and 25%. The method that used for this research is is the experimental method. This research aims to know the effect of using 12,5% metakaolin and variation of steel slag against the parameter of Self Compacting Concrete (SCC), split tensile strength, and modulus of rupture. The result of this research is that concrete is qualified as self-compacting concrete based on EFNARC 2005. The result from split tensile strength and modulus of rupture is 5,40 MPa and 8,26 MPa which uses 22.5% of steel slag ratio.

Keywords: High strength self compacting concrete, metakaolin, modulus of rupture, split tensil strength, steel slag.

Abstrak

Tidak dapat dipungkiri bahwa pembangunan infrastruktur akan terus meingkat di masa mendatang. Oleh karena itu, diperlukan inovasi pembuatan beton untuk menghasilkan beton berkualitas tinggi dengan waktu produksi yang singkat. Kebutuhan akan semen saat ini sangatlah banyak mengingat pembangunan yang meningkat pula, untuk mengurangi kerusakan lingkungan maka digunakan metakaolin sebesar 12,5% sebagai substitusi dari semen. Metakaolin memiliki sifat sebagai pozzolan yang dapat bereaksi secara pozzolanik. Dalam penelitian, steel slag digunakan sebagai substitusi dari agregat halus. Variasi steel slag yang diteliti yaitu 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25%. Metode yang digunakan dalam penelitian yaitu metode eksperimental. Tujuan dari penelitian adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan metakaolin 12,5% dengan variasi steel slag terhadap parameter Self Compacting Concrete (SCC), kuat tarik belah dan modulus of rupture beton High Strength Self Compacting Concrete (HSSCC). Dari hasil pengujian, beton memenuhi syarat beton SCC yang didasarkan pada EFNARC 2005. Hasil pengujian kuat tarik belah dan modulus of rupture, beton mencapai maksimum pada kadar steel slag 22,5% sebesar 5,40 MPa dan 8,26 MPa.

Kata Kunci : Beton mutu tinggi memadat mandiri, kuat tarik belah, metakaolin, modulus of rupture, steel slag

PENDAHULUAN

Kemajuan infrastruktur di seluruh penjuru dunia tidak dapat dipungkiri bahwa akan terus berkembang. Pembangunan pada zaman ini, dituntut untuk menghasilkan hasil yang memuaskan dengan waktu yang singkat untuk menyelesaikannya. Perlu dikembangkannya suatu inovasi beton yang menjadi salah satu bagian dalam suatu infrastruktur. Dalam SNI 03-6468-2000, high strength concrete memiliki definisi beton dengan kuat tekan lebih besar sama dengan 41,4 MPa. Self Compacting Concrete (SCC) merupakan beton segar yang memiliki sifat yang plastis dan dapat mengalir dibawah berat sendiri (Nepumoceno dkk, 2018; Xie dkk, 2021). Beton SCC harus memenuhi parameter yaitu passing ability, filling ability, dan segregation resistance sehingga tidak memerlukan bantuan alat getar untuk memadatkan sendiri (Shi dkk., 2015; Raja dkk., 2016).

Inovasi campuran beton yang digunakan untuk mengurangi penggunaan semen yaitu dengan metakaolin. Metakaolin memiliki sifat sebagai pozzolan yang dapat bereaksi dengan proses hidrasi semen. Metakaolin memiliki bentuk berupa butiran halus berukuran 0,5 hingga 5 mikron yang terbuat dari kaolin yang telah dipanaskan pada suhu 500°C hingga 900°C. Untuk mengurangi penggunaan pasir, maka digunakan limbah baja atau steel slag sebagai substitusi pasir. Steel slag merupakan limbah yang bebas B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) dan tidak mudah ter-

bakar maupun korosif. *Steel slag* memiliki *specific gravity*, berat volume, dan koefisien friksi yang tinggi, tingkat penyerapan air sedang, serta memiliki sifat ketahanan abrasi dan kekuatan yang bagus, serta daya dukung yang tinggi (Roslan dkk., 2016; Gencel dkk., 2021). Pengujian kuat tarik belah dan *modulus of rupture* merupakan salah satu pengujian yang dapat memberikan parameter nilai mengenai kekakuan dari inovasi beton ini.

Pengujian kuat tarik belah dimaksudkan untuk mengetahui nilai kuat tarik tidak langsung dari hasil pembebanan benda uji silinder dengan mesin *Compression Testing Machine* (CTM). Pengujian *modulus of rupture* dilakukan dengan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk mengetahui nilai kuat lentur maksimum pada beton sebelum runtuh akibat beban yang diberikan pada beton. Pengujian beton keras dilakukan pada saat beton mencapai umur 28 hari.

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh penggunaan metakaolin 12,5% dan variasi *steel slag* terhadap pengujian kuat tarik belah dan *modulus of rupture* pada beton HSSCC. Dalam penelitian ini, variasi kadar *steel slag* digunakan yaitu 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25%.

DASAR TEORI

Berdasarkan SNI 2847-2013, pengertian dari beton adalah campuran dari semen portland atau semen hidrolis, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambah. *High strength concrete* adalah salah satu beton inovatif dengan kualitas kerja lebih baik dan syarat lebih tinggi dibandingkan beton konvensional. Beton mutu tinggi dijelaskan dalam SNI 03-6468-2000, yang mendefinisikan dengan kuat tekan lebih besar sama dengan 41,4 MPa.

Beton memadat sendiri (*self compacting concrete*) merupakan inovasi beton mampu memadat sendiri yang memiliki sifat plastis dan mengalir dibawah berat sendiri. Berdasarkan EFNARC (2005), hal ini disebabkan karena beton SCC memiliki nilai *flow ability* tinggi sehingga mampu mengalir dibawah berat sendiri dan mampu mengisi bekisting dan memadat sendiri.

Menurut Sambowo (2002), metakaolin memiliki arti suatu bahan yang terbentuk dari hasil pembakaran (kalsinasi) bahan kaolin pada tempertaur 450°C – 900°C. Metakaolin memiliki dimensi partikel yang lebih kecil dari *steel slag*. Selain itu, SiO₂ dan Al₂O₃ (*pozzolan*) banyak terkandung dalam metakaolin yang dimana unsur tersebut merupakan unsur utama penyusun semen. Oleh karena itu, metakaolin dapat digunakan sebagai alternatif semen.

Menurut Nugraha (2007), *Steel slag* merupakan sisa dari pembuatan besi (*pig iron*) yang dibuat dengan proses *blast furnance* (tanur tiup). *Slag* terbentuk dari campuran alumunium, kalsium, silikon dan fospor yang bereaksi pada suhu 1600°C yang membentuk suatu cairan. Cairan tersebut akan didinginkan hingga menjadi kristal sehingga dapat digunakan sebagai campuran dari semen atau substitusi agregat.

METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang dilakukan untuk menghasilkan beton HSSCC yaitu dengan mensubstitusi metakaolin sebagai semen serta *steel slag* sebagai agregat halus yaitu pasir. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Rekayasa Struktur dan Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret Surakarta. Benda uji berbentuk silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm digunakan sebagai benda uji kuat tarik belah, sedangkan benda uji pengujian *modulus of rupture* yang digunakan yaitu balok berukuran panjang 40 cm; tinggi 10 cm; dan lebar 10 cm. Dalam Tabel 1 menjelaskan jumlah benda uji yang digunakan serta kode dari benda uji.

Tabel 1. Benda Uji Kuat Tarik Belah

No	<i>Steel Slag</i> (%)	Benda Uji	Umur (hari)	Jumlah
Kuat Tarik Belah				
1	0,0%	HSSCC-SS 0% - KTB	28	3
2	15,0%	HSSCC-SS 15% - KTB	28	3
3	17,5%	HSSCC-SS 17,5% - KTB	28	3
4	20,0%	HSSCC-SS 20% - KTB	28	3
5	22,5%	HSSCC-SS 22,5% - KTB	28	3
6	25,0%	HSSCC-SS 25% - KTB	28	3

Tabel 2. Benda Uji *Modulus of Rupture*

No	Steel Slag (%)	Benda Uji	Umur (hari)	Jumlah
<i>Modulus of Rupture</i>				
1	0,0%	HSSCC-SS 0% - MOR	28	3
2	15,0%	HSSCC-SS 15% - MOR	28	3
3	17,5%	HSSCC-SS 17,5% - MOR	28	3
4	20,0%	HSSCC-SS 20% - MOR	28	3
5	22,5%	HSSCC-SS 22,5% - MOR	28	3
6	25,0%	HSSCC-SS 25% - MOR	28	3

Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan bahwa terdapat 6 variasi kadar *steel slag* dimana untuk setiap variasi digunakan 3 buah beton yang nantinya pada saat umur 28 hari akan dilakukan pengujian beton keras yaitu kuat tarik belah dan *modulus of rupture*.

Mix Design Beton

Desain rancang campur yang digunakan yaitu metakaolin 12,5% dan variasi *steel slag* sebagai substitusi dari agregat halus. Tabel 3 merupakan rekapitulasi *mix design* beton.

Tabel 3. Data *Mix Design* Beton HSSCC Metakaolin 12,5% dan Variasi *Steel Slag*

Benda Uji	Agregat			Cementitious		SP (L/m ³)	Air (L/m ³)
	Agregat Halus (kg/m ³)	Agregat Kasar (kg/m ³)	SS (kg/m ³)	Semen (kg/m ³)	MK (kg/m ³)		
HSSCC-SS 0%	947,5	792,9	0	525	75	9	150
HSSCC-SS 15%	804,3	792,9	143,2	525	75	9	150
HSSCC-SS 17,5%	780,4	792,9	167,1	525	75	9	150
HSSCC-SS 20%	756,6	792,9	190,9	525	75	9	150
HSSCC-SS 22,5%	732,7	792,9	214,8	525	75	9	150
HSSCC-SS 25%	708,8	792,9	238,7	525	75	9	150

Tabel 3 menunjukkan komposisi penggunaan dari setiap variasi kadar *steel slag*. Superplasticizer yang digunakan sebesar 1,5% dan faktor air semen sebesar 0,25 dari berat semen.

Kuat Tarik Belah

Data yang diperoleh dari pengujian kuat tarik belah menggunakan mesin *Compression Testing Machine* (CTM) dihitung menggunakan Persamaan [1].

$$f't = \frac{2P}{\pi LD} \dots\dots\dots [1]$$

$f't$ merupakan kuat tarik belah (MPa); P merupakan beban uji maksimum (N); L merupakan panjang benda uji (mm); dan D merupakan diameter benda uji (mm).

Modulus of Rupture

Pengujian *modulus of rupture* dengan metode *center point loading* berdasarkan ASTM C293 menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) dihitung dengan menggunakan Persamaan [2].

$$R = \frac{3PL}{\pi LD} \dots\dots\dots [2]$$

R adalah *modulus of rupture* (MPa); P adalah beban total maksimum (N); L adalah panjang bentang balok (mm); B adalah lebar balok (mm); dan D adalah tinggi balok (mm).

Pengujian Beton Segar

Parameter yang harus dipenuhi untuk memenuhi syarat sebagai beton *self compacting concrete* yaitu *passing ability*, *filling ability*, dan *segregation resistance*. Pengujian yang dilakukan untuk memenuhi parameter beton SCC berdasarkan EFNARC 2005 diantaranya *slump flow test*, *L-box test*, dan *V-funnel test*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Beton Segar

Parameter beton segar HSSCC diantaranya *passing ability*, *filling ability*, dan *segregation resistance* menggunakan alat *Abrams Cone*, *flow table*, *L-Box*, dan *V-Funnel* mengacu pada EFNARC 2005. Rekapitulasi pengujian beton segar HSSCC tertera pada Tabel 4 hingga Tabel 6.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Slump Flow*

Benda Uji	Pengujian <i>Slump Flow</i>							
	T _{500 rata-rata} (detik)	Syarat	Ket.	D ₁ (mm)	D ₂ (mm)	D _{rata-rata}	Syarat	Ket.
HSSCC-SS 0%	4,7	2 – 5 detik EFNARC 2005	√	665	675	670	650 – 800 mm EFNARC 2005	√
HSSCC-SS 15%	4,4		√	700	710	705		√
HSSCC-SS17,5%	4,1		√	715	725	720		√
HSSCC-SS 20%	3,9		√	720	730	725		√
HSSCC-SS22,5%	3,7		√	725	745	735		√
HSSCC-SS 25%	3,4		√	755	735	745		√

Keterangan √ = memenuhi syarat

Tabel 5. Hasil Pengujian *L-Box*

Benda Uji	h ₂ (cm)	h ₁ (cm)	h ₂ /h ₁	Syarat	Keterangan
HSSCC-SS 0%	9	11	0,82	0,8 – 1 EFNARC 2005	√
HSSCC-SS 15%	8	9	0,89		√
HSSCC-SS 17,5%	9	10	0,90		√
HSSCC-SS 20%	10	11	0,91		√
HSSCC-SS 22,5%	10	10	1,00		√
HSSCC-SS 25%	9	9	1,00		√

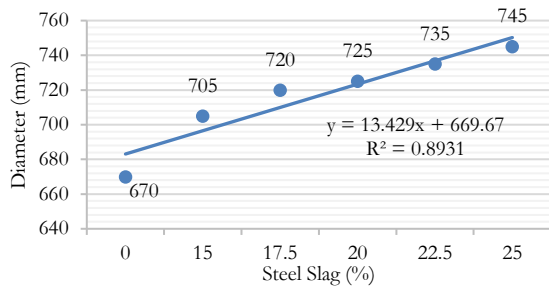
Keterangan √ = memenuhi syarat

Tabel 6. Hasil Pengujian *V-Funnel*

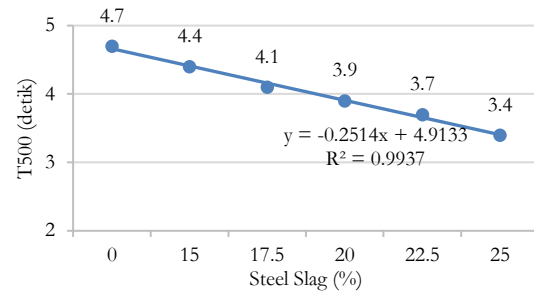
Benda Uji	V- Funnel (detik)	Syarat	Keterangan
HSSCC-SS 0%	11,5	6 – 12 detik EFNARC 2005	√
HSSCC-SS 15%	9,5		√
HSSCC-SS 17,5%	9		√
HSSCC-SS 20%	8		√
HSSCC-SS 22,5%	7,5		√
HSSCC-SS 25%	6,5		√

Keterangan √ = memenuhi syarat

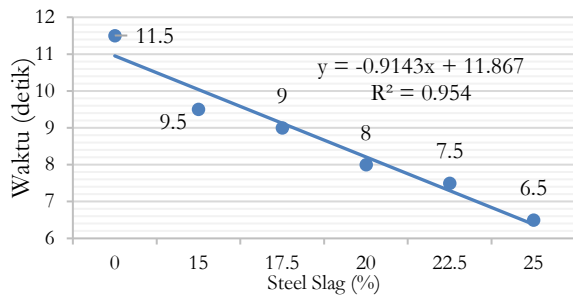
Dari Tabel 4 hingga Tabel 6 dibuat grafik yang tertera pada Gambar 1 hingga Gambar 4. Gambar 1 membuktikan bahwa kadar *steel slag* yang semakin tinggi maka menjadikan diameter sebaran beton akan semakin besar. Gambar 2 membuktikan bahwa semakin besar kadar *steel slag*, waktu yang dibutuhkan beton untuk mencapai diameter 50cm (T₅₀₀) semakin cepat. Berdasarkan Gambar 3 dapat ditarik kesimpulan bahwa kadar *steel slag* yang semakin tinggi maka waktu alir akan semakin cepat. Dari Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin besar kadar *steel slag* maka nilai h₂/h₁ *L-Box* mengalami peningkatan.



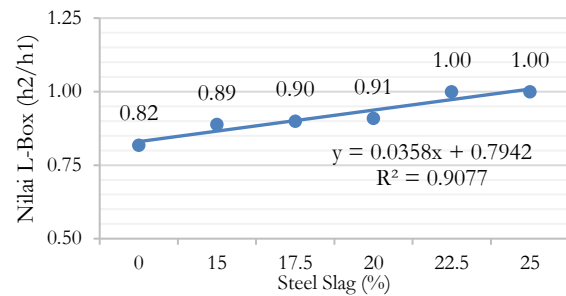
Gambar 1. Grafik Diameter Rata-Rata Slump Flow



Gambar 2. Grafik Waktu Alir (T₅₀₀)



Gambar 3. Grafik Nilai Waktu Alir V-Funnel



Gambar 4. Grafik Nilai h₂/h₁ pada Pengujian L-Box

Hasil Uji Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengetahui apakah beton masuk kedalam syarat sebagai beton dengan mutu tinggi (*high strength concrete*). Rekapitulasi dari pengujian kuat tekan beton tertera dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Uji Kuat Tekan (Syuja, 2022)

Benda Uji	f _c rerata (MPa)	Presentase kenaikan (%)
HSSCC - SS 0% - KTMOE	42,52	
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

Tabel 7 menunjukkan bahwa nilai kuat tekan mencapai maksimum pada kadar *steel slag* 22,5% yaitu sebesar 62,17. Hasil pengujian kuat tekan memenuhi persyaratan beton mutu tinggi seperti yang tertera dalam SNI 03-6468-2000 dimana memiliki kuat tekan lebih besar sama dengan 41,4 MPa.

Hasil Uji Kuat Tarik Belah

Rekapitulasi dari uji kuat tarik belah tertera dalam Tabel 8. Pengujian ini dilakukan pada saat beton berumur 28 hari. Tabel 8 menunjukkan bahwa dengan menggunakan *steel slag*, beton mengalami kenaikan nilai kuat tarik belah dan mencapai maksimum pada kadar *steel slag* 22,5% sebesar 5,40 MPa dengan kenaikan 31,48% terhadap beton tanpa kandungan *steel slag*.

Tabel 8. Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah

Benda Uji	Kode	D(cm)	L(cm)	2P (N)	fct(MPa)	fct rerata (MPa)	Kenaikan (%)
HSSCC-SS 0% - KTB	A	14,9	30	560000	3,99	4,11	-
	B	15	30	620000	4,38		
	C	15	30	560000	3,96		
HSSCC-SS 15% - KTB	A	15	30	660000	4,67	4,78	16,42
	B	15	30	680000	4,81		
	C	15	30	690000	4,88		
HSSCC-SS 17,5% - KTB	A	14,9	30	710000	5,05	4,85	18,09
	B	15	30	690000	4,88		
	C	14,9	30	650000	4,63		
HSSCC-SS 20% - KTB	A	15	30	740000	5,23	5,30	28,90
	B	14,9	29,9	760000	5,43		
	C	15	30	740000	5,23		
HSSCC-SS 22,5% - KTB	A	15	30,1	760000	5,36	5,40	31,48
	B	15	30,2	720000	5,06		
	C	15	30	820000	5,80		
HSSCC-SS 25% - KTB	A	15	30	710000	5,02	5,25	27,74
	B	15	30,1	780000	5,50		
	C	15	30	740000	5,23		

Hasil Pengujian *Modulus of Rupture*

Rekapitulasi dari pengujian *modulus of rupture* tertera pada Tabel 9 pada saat beton umur 28 hari.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Pengujian *Modulus of Rupture*

Benda Uji	Kode	B (cm)	D (cm)	L _{ef} (cm)	P (kgf)	P (N)	R (MPa)	R rerata (MPa)	Kenaikan (%)
HSSCC-SS 0%-MOR	A	10,1	10	302	1400	13729,31	6,16	6,35	
	B	10	10	301	1425	13974,48	6,31		
	C	10,1	10	301	1500	14709,98	6,58		
HSSCC-SS 15%-MOR	A	10,1	10,1	300	1690	16573,24	7,24	7,49	18,04
	B	10,1	10	300	1750	17161,64	7,65		
	C	10	10	301	1715	16818,40	7,59		
HSSCC-SS 17,5%-MOR	A	10,1	10,1	300	1790	17553,90	7,67	7,79	22,76
	B	10,2	10	301	1820	17848,10	7,90		
	C	10,2	10	300	1805	17701,00	7,81		
HSSCC-SS 20%-MOR	A	10,1	10,1	300	1835	17995,20	7,90	8,00	26,11
	B	10,2	10	300	1870	18338,44	8,09		
	C	10,1	10,1	299	1880	18436,50	8,03		
HSSCC-SS 22,5%-MOR	A	10	10	300	1950	19122,97	8,61	8,26	30,10
	B	10	10,1	301	1870	18338,44	8,12		
	C	10,1	10,1	300	1880	18436,50	8,05		
HSSCC-SS 25%-MOR	A	10	9,9	301	1700	16671,31	7,68	7,57	19,20
	B	10,1	10	301	1620	15886,77	7,10		
	C	10,1	10	302	1800	17651,97	7,92		

Tabel 9 menunjukkan bahwa *odulus of rupture* maksimum tercapai pada kadar *steel slag* 22,5% sebesar 8,26 MPa dengan kenaikan sebesar 30,10%.

Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah

Hubungan kuat tekan dan *modulus of rupture* tertera pada Tabel 10 yang didasarkan pada SNI T-15-1991-03 pasal 3.2.5 dan mendekati dengan syarat di SNI yaitu $f_{ct} = 0,7\sqrt{f_c}$.

Tabel 10. Hasil Pendekatan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah

Nama Benda Uji	fct (MPa)	f _c (MPa)	√f _c (MPa)	K	fct/f _c (%)
HSSCC-SS 0%-KTB	4,11	42,52	6,52	0,63	9,67
HSSCC-SS 15%-KTB	4,78	55,99	7,48	0,64	8,55
HSSCC-SS 17,5%-KTB	4,85	58,09	7,62	0,64	8,35
HSSCC-SS 20%-KTB	5,30	61,71	7,86	0,67	8,58
HSSCC-SS 22,5%-KTB	5,40	62,90	7,93	0,69	8,69
HSSCC-SS 25%-KTB	5,25	57,01	7,55	0,70	9,21

Dari Tabel 10 menunjukkan bahwa nilai kuat tarik belah dengan metakaolin 12,5% dan variasi *steel slag* pada kadar 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25% berturut turut sebesar 9,67%; 8,55%; 8,35%; 8,58%; 8,69%; dan 9,21% dari kuat tekan. Adapun faktor hubungan korelasi antara kuat tekan dengan kuat tarik belah adalah $f_{ct} = 0,59 - 0,65 \sqrt{f_c}$. Nilai korelasi ini menunjukkan hasil yang hampir sama dengan (Dipohusodo, 1999). Dalam penelitian ini menunjukkan bahwa nilai kuat tekan dan nilai kuat tarik belah berbanding lurus.

Hubungan *Modulus of Rupture* dan Kuat Tekan

Hubungan *modulus of rupture* dan kuat tekan tertera pada Tabel 11 yang didasarkan pada SNI 2847-2019 (R22.2.2.2) dan memenuhi syarat dari SNI yaitu 10-15% dari f_c.

Tabel 11. Hasil Pendekatan Kuat Tekan dan *Modulus of Rupture*

Nama Benda Uji	R rerata (MPa)	f _c rerata (MPa)	√f _c (MPa)	K	R/f _c
HSSCC-SS 0%-MOR	6,35	42,52	6,52	0,97	14,93
HSSCC-SS 15%-MOR	7,49	55,99	7,48	1,00	13,38
HSSCC-SS 17,5%-MOR	7,79	58,09	7,62	1,02	13,41
HSSCC-SS 20%-MOR	8,00	61,71	7,86	1,02	12,97
HSSCC-SS 22,5%-MOR	8,26	62,90	7,93	1,05	13,28
HSSCC-SS 25%-MOR	7,57	57,01	7,55	1,00	13,27

Tabel 11 menunjukkan bahwa kuat tarik belah dan *modulus of rupture* berbanding lurus, dimana nilai kuat tarik belah meningkat maka nilai *modulus of rupture* meningkat begitu juga sebaliknya. Faktor penyebab dari hal tersebut yaitu karena memiliki faktor yang sama antara lain reaksi antara metakaolin dan *steel slag*. Penambahan *steel slag* mempengaruhi kenaikan nilai uji kuat tarik belah dan *modulus of rupture*.

Penambahan *Steel Slag* Optimum pada Pengujian Kuat Tarik Belah

Untuk mengetahui presentase *steel slag* optimum dari persamaan regresi pada pengujian kuat tarik belah sebagai berikut:

$$y = -530,74 x^3 + 219,52 x^2 - 17,025 x + 4,1112$$

Diferensialkan sehingga didapatkan:

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$3 (-530,74) x^2 + 2 (219,52) - 17,025 = 0$$

$$-1592,22 x^2 + 439,04 x - 17,025 = 0$$

$$(x + 0,0467) (x + 0,2291) = 0$$

$$x_1 = 4,67 \% \text{ atau } x_2 = 22,91 \%$$

Dari persamaan diatas diambil nilai $x = 22,91 \%$ karena memiliki nilai mendekati nilai maksimum data hasil pengujian.

Substitusi nilai x yang didapatkan ke persamaan sebagai berikut:

$$y = -530,74 x^3 + 219,52 x^2 - 17,025 x + 4,1112$$

$$y = -530,74 (0,2291)^3 + 219,52 (0,2291)^2 - 17,025 (0,2291) + 4,1112$$

$$y = 5,35 \text{ MPa}$$

Dari hasil perhitungan persamaan regresi, didapatkan presentase kadar *steel slag* optimum dicapai pada kadar 22,91 % dengan kuat tarik belah yaitu 5,35 MPa.

Penambahan *Steel Slag* Optimum pada Pengujian *Modulus of Rupture*

Untuk mengetahui presentase *steel slag* optimum dari persamaan regresi pada pengujian *modulus of rupture* sebagai berikut:

$$y = -30,708 x^2 + 13,871 x + 6,3207$$

Diferensialkan sehingga didapatkan:

$$\frac{dy}{dx} = 0$$

$$2(-30,708)x + 13,871 = 0$$

$$-61,416x + 13,871 = 0$$

$$x = 22,58 \%$$

Substitusi nilai x yang didapatkan ke persamaan sebagai berikut:

$$y = -30,708 x^2 + 13,871 x + 6,3207$$

$$y = -30,708 (0,2258)^2 + 13,871 (0,2258) + 6,3207$$

$$y = 7,89 \text{ MPa}$$

Dari hasil perhitungan persamaan regresi, didapatkan presentase kadar *steel slag* optimum dicapai pada kadar 22,58 % dan kuat tarik belah optimum yang didapatkan sebesar 7,89 MPa.

KESIMPULAN

Dari penelitian dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Beton ini memenuhi standar *self compacting concrete* EFNARC 2005 yaitu *passing ability*, *filling ability*, serta *segregation resistance*.
2. Beton ini memiliki kuat tekan optimum sebesar 59,86 MPa sehingga memenuhi syarat *high strength concrete*.
3. Kuat tarik belah kadar *steel slag* 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25% pada umur 28 hari sebesar 4,11 MPa; 4,78 MPa; 4,85 MPa; 5,30 MPa; 5,40 MPa; dan 5,25 MPa. Penambahan kadar *steel slag* mencapai optimum pada kadar 22,91 % dengan kuat tarik belah sebesar 5,35 MPa.
4. *Modulus of Rupture* kadar *steel slag* 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25% secara berturut-turut sebesar 6,35 MPa; 7,49 MPa; 7,79 MPa; 8,00 MPa; 8,26 MPa; dan 7,57 MPa. Penambahan kadar *steel slag* mencapai optimum pada kadar 22,58 % dengan *modulus of rupture* sebesar 7,89 MPa.

REKOMENDASI

Rekomendasi dari penulis untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Penelitian selanjutnya diperlukan penambahan jumlah dari benda uji untuk menghindari benda uji yang rusak
2. Penelitian ini dapat dilanjutkan dengan melakukan pengujian yang lain pada beton *High Strength Self Compacting Concrete* dengan metakaolin 12,5% dan variasi *steel slag*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih penulis tujukan kepada seluruh dosen, mahasiswa, dan laboran di Laboratorium Bahan Konstruksi Program Studi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret yang telah membantu dalam kegiatan penelitian dan penulisan artikel ini.

REFERENSI

- Dipohusodo, 1999, "Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI-T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI".
- EFNARC, 2005, "Specification and Guidelines for Self Compacting Concrete".
- Gencil, O., Karadag, O., Oren, O.H. and Bilir, T., 2021. Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review. *Construction and Building Materials*, 283, p.122783.
- Nepomuceno, M., Pereira-de-Oliveira, L., & Pereira, S. (2018). Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates. *Construction and Building Materials*, 166, 373-385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.161>.
- Raja, K.S. and Dinesh, A., 2016. Study on self compacting concrete—a review. *Int. J. Eng. Res. Technol. (IJERT)*(5), pp.384-387.
- Roslan, N.H., Ismail, M., Abdul-Majid, Z., Ghoreishiamiri, S. and Muhammad, B., 2016. Performance of steel slag and steel sludge in concrete. *Construction and Building Materials*, 104, pp.16-24.

- Sambowo, Ir. Kusno Adi, 2002, "Engineering Properties and Durability Performance of Metakaolin and Metakaolin-PFA Concrete".
- Shi, C., Wu, Z., Lv, K. and Wu, L., 2015. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 84, pp.387-398.
- Standar Nasional Indonesia, 1991, "(SNI) T-15-1991-03: Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung".
- Standar Nasional Indonesia, 2000, "(SNI) 03-6468-2000: Tata Cara Perencanaan Campuran Beton Berkekuatan Tinggi dengan Semen Portland dengan Abu terbang".
- Standar Nasional Indonesia, 2002, "(SNI) 03-2491-2002: Metode Pengujian Kuat Tarik Belah Beton.
- Standar Nasional Indonesia, 2013, "(SNI) 2847:2013: Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan".
- Standar Nasional Indonesia, 2019, "(SNI) 2847:2019 (R22.2.2.2): Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan".
- Syuja, 2022, "Kajian Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas pada beton Memadat Mandiri Mutu Tinggi dengan Substitusi Metakaolin 12,5% sebagai Semen dan Variasi Steel Slag sebagai Agregat Halus".
- Xie, T., Ali, M., Elchalakani, M., & Visintin, P. (2021). Modelling fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing supplementary cementitious materials using reactive moduli. *Construction and Building Materials*, 272, 121954. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121954>.