

KAJIAN SERAPAN DAN PENETRASI KLORIDA PADA BETON MEMADAT MANDIRI MUTU TINGGI DENGAN METAKAOLIN 12,5% DAN VARIASI STEEL SLAG SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT HALUS

Wibowo^{1)*}, Endah Safitri²⁾, Muhammad Hanifa Barkah³⁾

^{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, Surakarta 57126. Telp: 0271-634524

Email : wibowotsipil87@ft.uns.ac.id

Abstract

A significant development makes the construction world expected to be able to create innovations, one of which is high strength self-compacting concrete. The use of metakaolin can be an innovation as a substitute for cement. Utilization of waste as an effort to conserve nature, one of which is abundant steel slag waste, can be used as a substitute for fine aggregate. The research method used in this research is experimental-mental with variations in the levels of steel slag, namely 0%; 15%; 17.5%; 20%; 22.5%; and 25% by weight of fine aggregate and the use of metakaolin 12.5%. In testing the absorption and penetration of chloride with a cylindrical specimen with a diameter of 7.5 cm and a height of 15 cm. The chloride absorption test was carried out by immersing the test object for 10+0.5 minutes and 24 hours, the results were that the greater the steel slag content used, the lower the chloride uptake in the concrete. The penetration test was carried out by immersing the specimen for 7, 14, 28 days, the result was that the greater the steel slag content used, the lower the chloride penetration in the concrete.

Keywords: Absorption, Penetration, Chloride, Metakaolin, Steel slag.

Abstrak

Perkembangan pembangunan yang sangat signifikan menjadikan dunia konstruksi diharapkan sanggup menciptakan inovasi yaitu salah satunya beton memadat mandiri mutu tinggi. Penggunaan metakaolin dapat menjadi inovasi sebagai pengganti semen. Pemanfaatan limbah sebagai usaha pelestarian alam salah satunya yaitu limbah *steel slag* yang melimpah dapat digunakan sebagai substitusi agregat halus. Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini yaitu eksperimental dengan variasi kadar *steel slag* yaitu 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25% dari berat agregat halus dan penggunaan metakaolin 12,5% dari berat binder. Pada pengujian serapan dan penetrasi klorida dengan benda uji berbentuk silinder dengan diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Pengujian serapan klorida dilakukan dengan merendam benda uji 10+0,5 menit dan 24 jam didapatkan hasil yaitu semakin besar kadar *steel slag* yang digunakan akan menurunkan serapan klorida pada beton. Pada pengujian penetrasi dilakukan dengan merendam benda uji selama 7, 14, 28 hari didapatkan hasil yaitu semakin besar kadar *steel slag* yang digunakan akan semakin menurunkan penetrasi klorida pada beton.

Kata Kunci : Serapan, Penetrasi, Klorida, Metakaolin, *Steel slag*

PENDAHULUAN

Infrastruktur berkembang signifikan dikarenakan hal tersebut salah satu sektor utama yang mendorong perekonomian suatu negara. Dunia konstruksi diharapkan berkembang lebih efektif dan efisien agar hasilnya sesuai dengan harapan. Beton memainkan peran sangat penting dalam industri konstruksi. Tantangan untuk menghasilkan beton yang berkualitas tinggi dan mudah digunakan muncul dari kemajuan teknologi dan meningkatnya permintaan akan bahan beton. Sehingga inovasi beton sangat diperlukan guna menunjang kebutuhan tersebut.

Beton memadat mandiri mutu tinggi dapat diartikan sebagai beton berkualitas mutu tinggi dengan *workability* yang baik, sehingga dapat dipadatkan tanpa alat bantu. Penggunaan beton memadat mandiri mutu tinggi saat ini banyak digunakan dalam berbagai bidang konstruksi. Beton memadat mandiri mutu tinggi merupakan inovasi beton yang menggabungkan dua unsur, yaitu beton mutu tinggi dan beton memadat mandiri. Beton memadat mandiri atau *Self Compacting Concrete* (SCC) adalah beton yang mampu mengalir tanpa mengalami segregasi serta dapat mengisi ruangan dalam tulangan yang sulit dicapai tanpa bantuan alat *vibrator* (Irawan, 2014; Raja dan Dinesh., 2016).

Landasan Teori

Beton dikategorikan memiliki kualitas yang baik jika memiliki kuat tekan tinggi, kedap air serta tidak keropos (Sarumathi dan Ramaswamy, 2016). Beton yang berongga rentan pada tempat yang agresif, zat asam dengan mudah

masuk ke dalam beton dan menyebabkan terjadinya korosi pada tulangan-tulangan yang ada di dalam beton. Hal tersebut dapat menyebabkan melemahnya kekuatan tulangan sehingga tidak akan berfungsi maksimal dan juga dapat merusak beton di sekitarnya (Nishimura, 2019). Metode dan teknologi baru diperlukan guna memungkinkan proses pengecoran bisa dikerjakan dengan merata dan terjaga homogenitas campuran beton. Penggunaan beton memadat mandiri mutu tinggi bisa menjadi solusi dari permasalahan tersebut (As'ad, 2012).

Penggunaan metakaolin pada beton normal dapat menjadikan pasta beton lebih homogen. Hal tersebut disebabkan karena terjadi reaksi antara metakaolin sebagai bahan pozzolan dengan kalsium hidrat yang merupakan hasil dari proses hidrasi semen. Metakaolin dapat dikatakan sebagai pozzolan yang sangat reaktif sehingga kualitas beton dapat meningkat dengan meningkatnya nilai kuat tekan dan berkurangnya waktu *setting* beton (Srivastava dkk, 2012).

Penggunaan *steel slag* sebagai substitusi agregat pada karakteristik *self compacting concrete* didapatkan hasil bahwa uji karakteristik *steel slag* memenuhi syarat sebagai pengganti agregat kasar, dan berdasarkan persyaratan beton SCC (*flow ability, segregation resistance, passing ability*) disimpulkan bahwa *steel slag* dapat digunakan sebagai agregat kasar dan agregat halus pada produksi beton SCC (Sheen dkk., 2015; Adiwijaya dkk., 2018; Pan dkk., 2019; Rosales dkk., 2020; Abendeh dan Baker, 2022).

Penyebab utama terjadinya korosi pada struktur beton di wilayah laut adalah penyerapan dan penetrasi klorida ke dalam beton (Mohammed dkk., 2020). Secara umum, beton dengan porositas rendah akan lebih tahan terhadap laju penetrasi ion klorida ke dalam beton. Penetrasi ion dengan difusi dominan terjadi di lingkungan yang mengandung ion klorida. Korosi sumuran dapat terjadi disebabkan oleh klorida yang dimulai dengan pembentukan lubang di mana lapisan pasif rusak, sehingga terjadilah korosi.

METODE

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental. Pada penelitian ini digunakan beton memadat mandiri mutu tinggi dengan metakaolin dan variasi kadar *steel slag* sebagai substitusi agregat halus. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Struktur dan Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret.

Pada penelitian terhadap beton memadat mandiri mutu tinggi dengan penambahan metakaolin dan *steel slag* ini menggunakan dua variabel yaitu variabel terikat dan variabel bebas. Variabel terikat terdiri dari *workability*, serapan dan penetrasi klorida (Cl₂). Variabel bebas terdiri dari beton mutu tinggi memadat mandiri dengan penggunaan variasi *steel slag* (0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25%).

Tabel 1. Jumlah benda uji serapan klorida

No	Kadar Metakaolin (%)	Kadar <i>Steel slag</i> (%)	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Benda Uji
1	12,5%	0	HSSCC-0%-SCL	28	3
2		15	HSSCC-15%-SCL	28	3
3		17,5	HSSCC-17,5%-SCL	28	3
4		20	HSSCC-20%-SCL	28	3
5		22,5	HSSCC-22,5%-SCL	28	3
6		25	HSSCC-25%-SCL	28	3
Jumlah					18

Tabel 2. Jumlah benda uji penetrasi klorida

No	Kadar Metakaolin (%)	Kadar <i>Steel slag</i> (%)	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Benda Uji
1	12,5%	0	HSSCC-0%-PCL	28	9
2		15	HSSCC-15%-PCL	28	9

3	17,5	HSSCC-17,5%-PCL	28	9
4	20	HSSCC-20%-PCL	28	9
5	22,5	HSSCC-22,5%-PCL	28	9
6	25	HSSCC-25%-PCL	28	9
	Jumlah			48

Mix Design

Mix design yang digunakan pada penelitian ini didasarkan pada EFNARC 2005. Tujuan dari dilakukan *Mix design* yaitu menentukan komposisi campuran material yang memenuhi persyaratan teknis sehingga didapatkan nilai kuat tekan beton yang diinginkan. Nilai kuat tekan yang direncanakan pada penelitian ini adalah 50MPa.

Pembuatan Benda Uji

Penelitian ini menggunakan benda uji silinder dengan diameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm. Pada pengujian penetrasi klorida, benda uji di-*seal* atau diberi pelindung menggunakan selotip pada bagian samping dan bawah sehingga larutan klorida hanya dapat terpenetrasi pada sisi atas dari benda uji.

Perawatan Benda Uji

Sesuai SNI 03-4810-1998 (BSN, 1998), perawatan benda uji bertujuan untuk mengurangi timbulnya retakan akibat dari penguapan berlebihan, dan menjaga kelembaban benda uji agar terhidrasi dengan baik dan mutu beton dapat terjamin (pengendalian mutu). Perawatan benda uji (*curing*) dilakukan di Laboratorium Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret Surakarta. Perawatan benda uji (*curing*) dilakukan selama 20 hari pada bak *curing*. Sebelum dilakukan *curing*, beton yang berada dicetakan didiamkan selama 24 jam kemudian dilakukan pelepasan cetakan. Setelah pelepasan cetakan beton didiamkan selama 7 hari sebelum pengujian pada tempat yang kering dan bersih. Setelah semua perawatan beton selesai maka dilakukan pengujian benda uji beton pada umur 28 hari.

Pengujian Serapan dan Penetrasi Klorida

Pengujian serapan dan penetrasi klorida memiliki tujuan untuk mengetahui besarnya daya serap air yang mengandung klorida dan seberapa dalam penetrasi klorida yang mampu menembus pada benda uji beton yang berumur 28 hari dengan merendam benda uji kemudian menghitung berat benda uji dan menghitung kedalaman penetrasi. Perhitungan serapan klorida menggunakan persamaan 1.

$$\text{serapan} = \frac{w-wk}{wk} \times 100\% \dots\dots\dots [1]$$

Dengan ,

w = Berat benda uji dalam keadaan kering permukaan (gram)

wk = Berat benda uji dalam keadaan kering oven (gram)

Perhitungan koefisien penetrasi menggunakan persamaan 2.

$$k = \frac{x}{t^{1/2}} \dots\dots\dots [2]$$

Selanjutnya dapat diperkirakan lama waktu paparan yang dibutuhkan untuk mencapai penetrasi sebesar 50 mm, menggunakan persamaan 3.

$$t_{50} = \left(\frac{50}{k}\right)^2 \dots\dots\dots [3]$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mix Design

Mix Design atau rancang campur pada penelitian ini berdasarkan pada EFNARC 2005 untuk beton memadat mandiri mutu tinggi dengan metakaolin 12,5% dan variasi *steel slag* sebagai agregat halus. *Steel slag* digunakan sebagai

substitusi agregat halus karena *steel slag* berperan sebagai *filler* yang nantinya dapat berdampak baik pada sifat mekanis beton. Penelitian ini menggunakan FAS atau faktor air semen sebesar 0,25 dengan kadar optimum *super-plasticizer* viscocrete 1003 sebesar 1,5% dari berat binder dan menggunakan agregat kasar yang memiliki ukuran 4,75 mm sampai dengan 12,5 mm. Rincian data pengujian tersajikan dilampiran dan rekapitulasi perhitungan rancang campur adukan beton dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Mix Design Beton HSSCC

Nama Benda Uji	Agregat			Cementitious		SP (lt/m ³)	Air (lt/m ³)
	Agregat Halus (kg/m ³)	Agregat 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

Beton memadat mandiri atau SCC memiliki beberapa parameter, parameter tersebut meliputi *passing ability*, *filling ability*, dan *segregation resistance* (Nepumoceno dkk, 2018). Parameter tersebut diujikan pada penelitian ini dengan mengacu pada standar EFNARC 2005 (Concrete, 2015). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4 - 6.

Tabel 4. Hasil Pengujian *Slump Flow*

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

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

Tabel 6. Hasil Pengujian *L-Bax*

Nama Benda Uji	h2	h1	h2/h1	Syarat	Kesimpulan
	(mm)	(mm)			
HSSCC-SS 0%	9	11	0,82	0,81 - 1 EFNARC 2005	Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 15%	8	9	0,89		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 17,5%	9	10	0,90		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 20%	10	11	0,91		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 22,5%	10	10	1,00		Memenuhi Syarat
HSSCC-SS 25%	9	9	1,00		Memenuhi Syarat

Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan di Laboratorium Bahan Teknik Sipil Universitas Sebelas Maret Surakarta. Hasil pengujian kuat tekan mengutip dari penelitian sebelumnya (Syuja, 2022) yang disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Rata-rata (Syuja, 2022)

No.	Nama Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1.	HSSCC-SS 0%	42,52	56,25
2.	HSSCC-SS 15%	55,99	
3.	HSSCC-SS 17,5%	58,09	
4.	HSSCC-SS 20%	61,71	
5.	HSSCC-SS 22,5%	62,17	
6.	HSSCC-SS 25%	57,01	

Pengujian Serapan Klorida

Pengujian serapan klorida dilakukan dengan merendam benda uji selama 10+0,5 menit dan 24 jam kemudian di timbang berat benda uji dalam keadaan kering permukaan/ *saturated surface dry* (ssd). Sebelum direndam, benda uji dikeringkan dengan oven selama 24 dengan suhu 100 derajat untuk mengetahui berat dalam keadaan kering oven, kemudian dicatat. Hasil uji serapan klorida dapat dilihat pada Tabel 8 dan Tabel 9.

Tabel 8. Hasil Pengujian Serapan Klorida pada Waktu Perendaman 10+0,5 Menit.

No.	Nama Benda Uji	Kode Benda Uji	Berat Kering Oven (gram)	Berat SSD (gram)	Serapan (%)	Serapan Rata-rata (%)	Penurunan (%)
1.	HSSCC-SS 0%-SCL	A	1504,00	1512,00	0,53	0,51	-
		B	1518,00	1526,00	0,53		
		C	1514,00	1521,00	0,46		
2.	HSSCC-SS 15%-SCL	A	1480,50	1486,00	0,37	0,40	20,90
		B	1483,50	1489,00	0,30		
		C	1518,00	1525,00	0,46		
3.	HSSCC-SS 17,5%-SCL	A	1454,00	1459,00	0,34	0,36	29,68
		B	1427,50	1432,00	0,32		
		C	1468,00	1473,00	0,34		
4.	HSSCC-SS 20%-SCL	A	1508,00	1512,00	0,27	0,28	44,59
		B	1440,00	1443,00	0,21		
		C	1508,00	1512,00	0,27		
5.	HSSCC-SS 22,5%-SCL	A	1451,00	1454,50	0,24	0,23	54,83
		B	1454,00	1457,00	0,21		
		C	1460,50	1464,00	0,24		
6.	HSSCC-SS 25%-SCL	A	1449,50	1452,00	0,17	0,17	66,47
		B	1502,00	1504,50	0,17		
		C	1460,00	1462,50	0,17		

Tabel 8 menunjukkan bahwa penggunaan *steel slag* dengan kadar 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25% mengalami penurunan nilai serapan klorida jika dibandingkan dengan beton tanpa *steel slag* pada perendaman 10+0,5 menit dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 20,90%; 29,68%; 44,59%; 54,83% dan 66,47%.

Tabel 9. Hasil Pengujian Serapan Klorida pada Waktu Perendaman 24 Jam

No.	Nama Benda Uji	Kode Benda Uji	Berat Kering Oven (gram)	Berat SSD (gram)	Serapan (%)	Serapan Rata-rata (%)	Penurunan (%)
1.	HSSCC-SS 0%-SCL	A	1504,00	1514,00	0,66	0,68	-
		B	1518,00	1529,00	0,72		
		C	1514,00	1524,00	0,66		
2.	HSSCC-SS 15%-SCL	A	1480,50	1489,00	0,57	0,55	20,09
		B	1483,50	1490,00	0,44		
		C	1518,00	1527,50	0,63		
3.	HSSCC-SS 17,5%-SCL	A	1454,00	1461,00	0,48	0,48	29,34
		B	1427,50	1434,50	0,49		
		C	1468,00	1475,00	0,48		
4.	HSSCC-SS 20%-SCL	A	1508,00	1514,50	0,43	0,39	42,48
		B	1440,00	1446,00	0,42		
		C	1508,00	1513,00	0,33		
5.	HSSCC-SS 22,5%-SCL	A	1451,00	1456,00	0,34	0,33	51,39
		B	1454,00	1458,50	0,31		
		C	1460,50	1465,50	0,34		
6.	HSSCC-SS 25%-SCL	A	1449,50	1454,00	0,31	0,27	60,17
		B	1502,00	1506,00	0,27		
		C	1460,00	1463,50	0,24		

Tabel 9 menunjukkan bahwa dengan penggunaan *steel slag* dengan kadar 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25% mengalami penurunan nilai serapan klorida jika dibandingkan dengan beton tanpa *steel slag* pada perendaman 24 jam dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 20,09%; 29,34%; 42,48%; 51,39% dan 60,17%.

Pengujian Penetrasi Klorida

Data uji penetrasi disajikan pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Pengujian Penetrasi Klorida

Nama Benda Uji	Waktu Rendaman (Hari)	Kedalaman Penetrasi (mm)			Kedalaman Rata-rata (mm)	Penurunan (%)	Penurunan rata-rata (%)
		A	B	C			
HSSCC-SS0%-PCL	7	10	9	10	9,67	-	-
	14	12	13	12	12,33	-	
	28	15	16	15	15,33	-	
HSSCC-SS15%-PCL	7	8	7	7	7,33	24,14	21,77
	14	10	10	9	9,67	21,62	
	28	12	12	13	12,33	19,57	
HSSCC-SS17,5%-PCL	7	6	6	5	5,67	41,38	38,00
	14	8	8	7	7,67	37,84	
	28	10	9	11	10,00	34,78	
HSSCC-SS20%-PCL	7	5	4	4	4,33	55,17	52,17
	14	6	7	5	6,00	51,35	
	28	8	7	8	7,67	50,00	
HSSCC-SS22,5%-PCL	7	3	3	3	3,00	68,97	64,90
	14	5	4	4	4,33	64,86	
	28	6	6	6	6,00	60,87	
HSSCC-SS25%-PCL	7	3	2	3	2,67	72,41	70,75
	14	4	3	4	3,67	70,27	
	28	5	4	5	4,67	69,57	

Tabel 10 menunjukkan bahwa dengan penggunaan *steel slag* dengan kadar 15%; 17,5%; 20%; 22,5%; dan 25% mengalami penurunan kedalaman penetrasi klorida jika dibandingkan dengan beton tanpa *steel slag* dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 21,77%; 38,00%; 52,17%; 64,90% dan 70,75%. Tabel 11 menyajikan koefisien penetrasi klorida dan Tabel 12 menyajikan waktu penetrasi untuk mencapai 50 mm.

Tabel 11. Koefisien penetrasi klorida

Nama Benda Uji	Koefisien Penetrasi (mm/tahun ^{1/2})			
	7 Hari	14 Hari	28 Hari	Rata-rata
HSSCC-SS0%-PCL	69,80	62,97	55,36	62,71
HSSCC-SS15%-PCL	52,95	49,36	44,53	48,95
HSSCC-SS17,5%-PCL	40,92	39,15	36,11	38,72
HSSCC-SS20%-PCL	31,29	30,64	27,68	29,87
HSSCC-SS22,5%-PCL	21,66	22,13	24,65	22,81
HSSCC-SS25%-PCL	19,26	18,72	16,85	18,28

Tabel 12. Waktu penetrasi untuk mencapai 50 mm

Nama Benda Uji	T50 (tahun)
HSSCC-SS0%-PCL	0,64
HSSCC-SS15%-PCL	1,04
HSSCC-SS17,5%-PCL	1,67
HSSCC-SS20%-PCL	2,80
HSSCC-SS22,5%-PCL	4,80
HSSCC-SS25%-PCL	7,49

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, analisis data, dan evaluasi yang telah dilakukan mengenai kajian serapan dan penetrasi klorida pada beton memadat mandiri mutu tinggi (HSSCC) dengan metakaolin 12,5% dan variasi kadar *steel slag* dengan benda uji berdiameter 7,5 cm dan tinggi 15 cm, dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil pengujian parameter SCC dan uji kuat tekan pada campuran beton dengan substitusi metakaolin 12,5% sebagai semen dan variasi *steel slag* sebagai agregat halus memenuhi syarat sebagai beton *high strength self compacting concrete* (HSSCC).
2. Hasil nilai serapan rata-rata klorida pada beton metakaolin 12,5% dengan variasi kadar *steel slag* kadar 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5% dan 25% pada waktu perendaman 10+0,5 menit mengalami penurunan jika dibandingkan dengan beton tanpa *steel slag* dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 20,90%; 29,68%; 44,59%; 54,83% dan 66,47%. Sementara itu, pada waktu perendaman 24 jam serapan rata-rata klorida mengalami penurunan jika dibandingkan dengan beton tanpa *steel slag* dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 20,09%; 29,34%; 42,48%; 51,39% dan 60,17%. Oleh karena itu, serapan klorida pada beton dengan variasi *steel slag* telah memenuhi syarat SNI-03-2914-1992 yaitu berat beton setelah perendaman selama 10+0,5 menit dan 24 jam berturut-turut tidak lebih dari 2,5% dan 6,5% dari berat beton kering oven.
3. Hasil nilai kedalaman penetrasi klorida rata-rata pada beton metakaolin 12,5% dengan variasi kadar *steel slag* 0%; 15%; 17,5%; 20%; 22,5% dan 25% menunjukkan bahwa semakin banyak kadar *steel slag* yang digunakan maka nilai penetrasi akan semakin menurun jika dibandingkan dengan beton tanpa *steel slag* dengan persentase penurunan berturut-turut sebesar 21,77%; 38,00%; 52,17%; 64,90% dan 70,75%. Dengan mensubstitusikan *steel slag* dengan kadar maksimum 25% akan menurunkan kedalaman penetrasi klorida. Hasil ini membuktikan bahwa beton yang menggunakan bahan tambah *steel slag* dapat mengurangi kerusakan dari infiltrasi klorida.

REKOMENDASI

Penelitian ini dapat ditinjaulanjuti tetapi perlu dilakukan beberapa koreksi agar penelitian selanjutnya didapatkan hasil yang lebih baik. Adapun saran-saran untuk penelitian selanjutnya adalah :

1. Penelitian selanjutnya disarankan agar membuat benda uji dengan jumlah yang lebih dari yang diperlukan sehingga data yang dihasilkan dapat lebih akurat dan jika ada kerusakan benda uji dapat dijadikan sebagai cadangan.
2. Pembuatan *seal* pada sampel beton pada pengujian penetrasi perlu dipersiapkan yang baik sehingga ketika proses perendaman, klorida hanya dapat terpenetrasi pada sisi yang telah ditentukan.
3. Pada pengujian kuat tekan, dilakukan pengujian tidak hanya pada hari ke 28 saja, agar tahu pola peningkatan kekuatan dari awal sampai dengan umur 28 hari.

UCAPAN TERIMAKASIH

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

REFERENSI

- Abendeh, R.M. and Bani Baker, M., 2022. Using steel slag aggregate to strengthen self-compacting concrete durability. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 175(12), pp.925-939.
- Adiwijaya, A., Datu, I. T., & Khairil, K., 2018, Penerapan Slag Baja sebagai Pengganti Agregat pada Karakteristik Self Compacting Concrete. Seminar Nasional Hasil Teknik Sipil Politeknik Negeri Ujung Pandang.
- As'ad, S. (2012). Beton Memadat Mandiri. *Harian Joglo Semarang*.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN), 1998, SNI 03-4810-1998. "Metode Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton di Lapangan". DPU, Jakarta.
- Concrete, S.C., 2005, The European guidelines for self-compacting concrete. *BIBM, et al*, 22, p.563.
- Irawan, I., 2014, Pengaruh Silica Fume Terhadap Beton Mutu Tinggi Self Compacting Concrete. repository.upi.edu.
- Mohammed, H., Ortoneda-Pedrola, M., Nakouti, I. and Bras, A., 2020, Experimental characterisation of non-encapsulated bio-based concrete with self-healing capacity. *Construction and Building Materials*, 256, p.119411.
- 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>.
- Nishimura, T. (2019). Electrochemical Behavior of Steel in Concrete Under Wet and Dry Condition with NaCl Solution. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28, 1500-1508. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03909-3>.
- Pan, Z., Zhou, J., Jiang, X., Xu, Y., Jin, R., Ma, J., Zhuang, Y., Diao, Z., Zhang, S., Si, Q. and Chen, W., 2019. Investigating the effects of steel slag powder on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 200, pp.570-577.
- Raja, K.S. and Dinesh, A., 2016, Study on self compacting concrete—a review. *Int. J. Eng. Res. Technol.(IJERT)*(5), pp.384-387.
- Rosales, J., Agrela, F., Entrenas, J.A. and Cabrera, M., 2020, Potential of stainless steel slag waste in manufacturing self-compacting concrete. *Materials*, 13(9), p.2049.
- Sarumathi, M., & Ramaswamy, S., 2016, Performance and Effectiveness of Concrete Coatings - A State of Art Review. *International journal of scientific research*, 5.
- Sheen, Y.N., Le, D.H. and Sun, T.H., 2015, Innovative usages of stainless steel slags in developing self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 101, pp.268-276.
- Srivastava, V., Kumar, R., & Agarwal, V., 2012, Metakaolin Inclusion: Effect on Mechanical Properties of Concrete. *Civil Engineering Departement MNNIT*.
- Syuja, M. N., 2022, 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.