



PEMANFAATAN STEEL SLAG SEBAGAI SUBSTITUSI AGREGAT KASAR PADA PEMBUATAN BETON HVFA-SCC TAHAN SERANGAN SULFAT

Nur Khotimah Handayani^{1*}, dan Nugroho Aldini Trisnawan²

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. A. Yani Tromol Pos 1 Pabelan, Kartasura, Surakarta, Indonesia, Kode Pos 57102

*Email: nur.k.handayani@ums.ac.id

Diajukan: 09/11/2023 Direvisi: 22/12/2023 Diterima: 22/12/2023

Abstrak

Penggunaan beton dengan volume fly ash tinggi atau High Volume Fly ash (HVFA) yang dipadukan dengan konsep Self Compacting Concrete (SCC) telah terbukti mampu meningkatkan kekuatan beton terhadap serangan sulfat. Pengembangan dilakukan dengan menambahkan steel slag sebagai pengganti agregat kasar yang mampu meningkatkan kekuatan beton sekaligus pemanfaatan steel slag untuk mengurangi limbah hasil peleburan besi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penambahan steel slag sebagai substitusi agregat kasar pada HVFA-SCC terhadap kekuatan beton yang mengalami serangan sulfat. Serangan sulfat diskenarioikan dalam 4 metode perendaman, yaitu air laut, larutan sulfat 5%, larutan sulfat 5% dengan cara rendam angkat dan air aquades sebagai kontrol. Untuk mengukur kekuatan beton dilakukan pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas dengan perencanaan awal sebesar 35 MPa, sedangkan untuk mengukur workability menggunakan pengujian slump flow dan L-box. Presentase penggunaan steel slag sebesar 20% dari total agregat kasar dan presentase penggunaan fly ash 50% dari total semen yang digunakan. Hasil pengujian menunjukkan substitusi 20% steel slag pada HVFA-SCC dapat meningkatkan kuat tekan beton pada semua metode serangan sulfat, sehingga penggunaan steel slag pada HVFA-SCC dapat menjadi alternatif dalam pembuatan beton tahan serangan sulfat.

Kata Kunci: HVFA-SCC, Serangan Sulfat, Steel Slag

Abstract

The use of concrete with high fly ash volumes (HVFA) combined with the Self Compacting Concrete (SCC) concept has been proven to increase the strength of concrete against sulfate attacks. The development is carried out by adding steel slag as a substitute for coarse aggregate which can increase concrete strength as well as the use of steel slag to reduce waste from iron smelting. The purpose of this study was to determine the effect of adding steel slag as a substitute for coarse aggregate in High Volume Fly ash-Self Compacting Concrete (HVFA-SCC) on the strength of concrete subjected to sulfate attack. Sulfate attack is concentrated in 4 soaking methods, namely seawater, 5% sulfate solution, 5% sulfate solution by lifting soak and ordinary water as a control. To measure the level of strength, compressive strength and modulus of elasticity testing was carried out with an initial plan of 35 Mpa, while to measure workability using slump flow and L-box testing. The percentage of steel slag use is 20% of the total coarse aggregate and the percentage of fly ash use is 50% of the total cement used. The substitution of 20% steel slag to HVFA-SCC can increase compressive strength on all sulfate attack methods, so the use of steel slag in HVFA-SCC can be an alternative in making sulfate-resistant concrete.

Keywords: HVFA-SCC, Sulfate Attack, Steel Slag

1. PENDAHULUAN

Durabilitas beton sebagai material konstruksi sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor yang mampu menurunkan daya tahan dan kekuatan beton. Faktor menurunnya durabilitas beton salah satunya disebabkan oleh serangan berbagai jenis asam seperti sulfat, fosfat, oksalat, klorida, nitrat, dan lain-lain. Salah satu asam yang paling merusak beton adalah asam sulfat (Allahverdi & Škvára, 2000). Hal ini karena reaksi asam sulfat pada beton akan menghasilkan *gypsum* yang menambah volume beton sehingga dapat menurunkan kekuatan beton (Abd Rahman dkk., 2023). Perbaikan material beton pada daerah yang rentan terhadap serangan sulfat dilakukan melalui pemakaian semen tipe V atau semen dengan bahan tambah pozolan. Bahan pozolan memiliki kandungan silika dan alumina yang akan mengeras jika bereaksi dengan air dan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen.

Salah satu material pozolan adalah *fly ash*. *Fly ash* merupakan hasil pembakaran batu bara yang telah dihapus dari kategori limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) berdasarkan Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. *Fly ash* telah banyak dimanfaatkan untuk memperbaiki kualitas semen karena dapat menaikkan komponen senyawa kimia, menaikkan kuat tekan, serta mengurangi keretakan atau ekspansi semen. *Fly ash* juga meningkatkan durabilitas karena kandungan pozolan dalam *fly ash* mampu memperkecil laju infiltrasi asam ke dalam beton (Indriyanto dkk., 2020; Wijaya dkk., 2021).

Substitusi semen dengan *fly ash* pada volume yang besar sekitar 50-70% memunculkan istilah beton High Volume *Fly ash* (HVFA). Penggunaan *fly ash* yg cukup besar ini telah terbukti menurunkan permeabilitas serangan asam dan meminimalkan risiko korosi (Madhavi et al., 2014). HVFA menjadi alternatif mengurangi penggunaan semen dan bermanfaat untuk lingkungan. Kadar optimum untuk kekuatan beton HVFA adalah 50% yang juga dipakai dalam penelitian ini (Madhavi dkk., 2014; Patnaikuni dkk., 2013; Solikin & Setiawan, 2017).

Selain penambahan material pozolan, perbaikan material beton pada daerah yang

rentan terhadap serangan sulfat dapat dilakukan melalui pengurangan faktor-air-semen (FAS). FAS merupakan variabel yang penting dalam meminimalisir serangan sulfat pada beton karena rasio air yang tinggi menghasilkan beton dengan kepadatan yang rendah, permeabilitas yang tinggi dan rentan terhadap serangan ion sulfat (Wu dkk., 2023). Salah satu kerugian ketika melakukan pengurangan air semen adalah kelecakan beton yang akan berkurang. Permasalahan kelecakan beton yang kurang dapat diselesaikan dengan metode *Self Compacting Concrete* (SCC) (Solikin dkk., 2013). SCC memiliki kelecakan yang lebih cair sehingga mampu mengalir sendiri memenuhi media cetak dan mencapai kepadatan maksimum karena rongga udara berkurang (EPG, 2005). Rongga udara yang lebih sedikit pada *Self Compacting Concrete* dapat memperlambat penetrasi larutan sulfat ke dalam beton, sehingga memperlambat laju kerusakan beton akibat serangan sulfat. Oleh sebab itu, kombinasi HVFA dengan SCC (selanjutnya disebut HVFA-SCC) diharapkan mampu menciptakan beton yang mampu menahan serangan sulfat.

Penelitian terkait beton tahan serangan sulfat sangat dibutuhkan di Indonesia mengingat Indonesia merupakan negara kepulauan dengan banyak bangunan di tepi laut. Hal ini karena pembangunan pelabuhan tepi pantai adalah salah satu kebutuhan mendasar dalam upaya ketercapaian strategis pembangunan nasional (Biro Perencanaan-Setjen KKP, 2021). Air laut sendiri merupakan salah satu sumber serangan sulfat yang dapat menurunkan durabilitas beton.

Selain itu, penggunaan material agregat kasar secara berlebihan perlu diperhatikan karena dapat merusak sumber daya alam. Alternatif pengganti material agregat kasar dapat menggunakan limbah baja/*steel slag*. Beton dengan *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar telah terbukti meningkatkan performa beton; baik kuat tekan, kuat geser dan kuat lentur; jika dibandingkan dengan beton konvensional yang memakai agregat kasar alam seluruhnya (Lie & Narayudha 2008; Awoyera dkk. 2016; Dey dkk. 2022; Handayani dkk. 2022). Bahkan substitusi *steel slag* mampu menghasilkan beton yang lebih tahan radiasi gamma dan neutron dibanding beton

konvensional karena beton dengan substitusi steel slag memiliki kepadatan yang tinggi (Aliyah dkk., 2023; Amin dkk., 2023). Material beton dengan kepadatan yang tinggi inilah yang diharapkan mampu menjadikan beton tahan terhadap serangan sulfat.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar pada *High Volume Fly ash-Self Compacting Concrete* (HVFA-SCC) dan pengaplikasiannya pada serangan sulfat. Hal ini karena steel slag telah terbukti dapat dipakai dan memenuhi syarat sebagai substitusi pada SCC (Adiwijaya dkk., 2021) dan mampu meningkatkan kuat tekan pada HVFA-SCC (Wardhono, 2021). Namun penelitian terkait substitusi *steel slag* pada HVFA-SCC belum banyak dilakukan terutama pengaplikasiannya pada beton tahan serangan sulfat.

2. METODOLOGI

Penelitian eksperimental dilakukan untuk mengetahui pengaruh substitusi *steel slag* pada sifat mekanik HVFA-SCC terhadap serangan sulfat. Sifat mekanik yang diuji adalah kuat tekan dan modulus elastis.

2.1 Material dan benda uji

Sampel benda uji untuk kuat tekan beton berbentuk silinder dengan ukuran 15 cm x 30 cm. Rancang campuran HVFA-SCC dengan kuat tekan rencana 35 MPa yang digunakan dalam penelitian ini sesuai penelitian Handayani dkk. (2022). Substitusi *fly ash* pada semen sebesar 50% sesuai rekomendasi Madhavi dkk., (2014); Patnaikuni dkk., (2013); Solikin & Setiawan, (2017). Substitusi *steel slag* 20% terhadap agregat kasar digunakan sesuai rekomendasi Awoyera dkk., (2016); dan Deepak dkk., (2023) untuk beton normal.

Syarat kelecakan yang tinggi pada SCC harus terpenuhi, maka digunakan bahan tambah *superplasticizer*. *Superplasticizer* yang dipakai adalah Sika viscocrete-1003. Faktor-air-semen yang digunakan adalah 0.3, dengan berat jenis semen, FA, pasir, kerikil dan *steel slag* berturut-turut sebesar 3150; 2650; 2700; 2530 dan 2680 kg/m³.

Dua jenis rancang campuran beton dipakai untuk mengetahui pengaruh penambahan *steel slag* 20 % pada HVFA-SCC. Rancang campuran

HS-N merupakan rancang campuran HVFA-SCC tanpa substitusi agregat kasar, sedang HS-S merupakan rancang campuran HVFA-SCC dengan *Steel Slag* sebagai substitusi agregat kasar sebesar 20%. *Fly ash* yang digunakan berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Rembang, agregat halus dari pasir gunung Merapi, agregat kasar ukuran maksimal 20 mm dari Gunung Tugel, dan *steel slag* didapat dari limbah industri pengolahan baja di Ceper, Klaten. Rancang campuran secara rinci ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rancang campuran beton per m³ (Handayani dkk. 2022)

Material	Rancang Campur		Satuan
	HS-S	HS-N	
Semen	297,49	297,49	kg
Fly ash	264,43	264,43	kg
Pasir	947,66	947,66	kg
Kerikil	581,23	726,54	kg
Steel slag	153,92	-	kg
Air	163	163	liter
Superplasticizer	8,43	8,43	liter

Tabel 2. Hasil uji laboratorium air laut

Parameter	Satuan	Hasil Analisa	Standar
pH	-	8,51	6,0 – 9,0
Sulfat	mg/l	2.770	-
Klorida	mg/l	21.900	-

Tabel 3. Pengujian kerikil dan *steel slag*

Jenis Pengujian	Agregat Kasar		Standar
	Kerikil	Steel slag	
Keausan	25,90 %	36,50 %	< 40 %
Berat jenis	2,53	2,68	2,50 – 2,70
Absorpsi	2,68 %	1,06 %	< 3 %
Gradasi Agregat	20 mm	20 mm	Daerah 20 mm dan 40 mm
Modulus halus	6,52	6,39	5 - 8

Benda uji setelah 1 hari dikeluarkan dari cetakan dan selanjutnya dilakukan perendaman beton. Perendaman bertujuan untuk menjaga proses hidrasi semen agar berjalan dengan baik serta menghindari keretakan (*cracking*)

sehingga menghasilkan beton dengan kuat tekan yang maksimal.

Perendaman dilakukan melalui 4 metode, yaitu 1) perendaman menggunakan rendaman air aquades sebagai kontrol sampel beton yang tidak terendam oleh sulfat; 2) perendaman dengan air laut untuk mengetahui pengaruh serangan sulfat alami terhadap beton; 3) perendaman dengan larutan magnesium sulfat ($MgSO_4$) 5% karena garam magnesium sulfat; dan 4) perendaman dengan larutan magnesium sulfat ($MgSO_4$) 5% dengan perlakuan rendam angkat setiap 2 hari sekali untuk mensimulasikan pasang surut air laut. Maksud dari larutan Magnesium Sulfat 5% adalah larutan yang digunakan untuk perendaman beton terdiri dari 95% air aquades + 5% cairan murni magnesium sulfat ($MgSO_4$). Air laut yang digunakan untuk merendam sampel beton berasal dari pantai Utara Pulau Jawa, tepatnya di daerah laut Kec. Kragan, Kab. Rembang. Hasil pengujian air laut yang digunakan tersaji dalam Tabel 2.

Perendaman dilakukan selama 28 hari. Selama 28 hari perendaman, bejana dikondisikan di ruangan yang terhindar dari cahaya matahari serta bejana ditutup dengan terpal untuk menghindari perubahan konsentrasi klorida yang terkandung di dalam media larutan. Total sampel pengujian adalah 48 sampel benda uji. Penamaan sampel benda uji berdasarkan rancang campuran dan metode perendaman. HS-N1, HS-N2, HS-N3 dan HS-N4 adalah sampel rancang campuran HS-N pada kondisi perendaman aquades, air laut, larutan magnesium sulfat 5% dan perendaman larutan magnesium sulfat 5% (rendam-angkat).

Tabel 4. Pengujian *slump flow* & *L-box*

Jenis Pengujian	Parameter	Rancang campuran		Standar	Kesimpulan
		HS-S	HS-N		
<i>Slump flow</i>	Diameter (mm)	693,33	658,33	650-800	Syarat terpenuhi
<i>L-box</i>	PA = H2/H1	0,88	0,81	0,8 – 1,0	Syarat terpenuhi

*PA = *passing ability*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 *Slump flow* & *L-box*

Pengujian *slump flow* berfungsi untuk mengukur penyebaran SCC tanpa adanya halangan sedangkan pengujian *L-box* dilakukan untuk mengetahui nilai beton segar saat mengalir melewati halangan (*passing ability*).

Penamaan yang sama dilakukan pada rancang campuran HS-S.

Agregat halus yang digunakan telah memenuhi standar untuk uji organik, berat jenis, nilai absorpsi, kandungan lumpur dan memenuhi kriteria gradasi untuk daerah II sesuai SNI C136:2012. Kerikil maupun limbah *steel slag* telah memenuhi standar material agregat kasar berdasarkan nilai keausan, berat jenis, absorpsi dan modulus halus. Perbandingan keduanya dapat dilihat pada Tabel 3 dimana *steel slag* terlihat mempunyai nilai keausan yang lebih tinggi dibandingkan nilai keausan agregat alami kerikil namun nilai tersebut masih dibawah batas maksimum 40%.

2.2 Pengujian kuat tekan dan sifat mekanik

Pengujian kuat tekan dan modulus elastis dilakukan pada benda uji silinder menggunakan alat uji *Universal Testing Machine (UTM)* dengan tahapan pengujian mengacu pada SNI 1974:2011 dan SNI 03-4169-1996. Semua sampel diuji modulus elastisnya bersamaan ketika melakukan uji kuat tekan beton. Nilai modulus elastis beton dihitung berdasarkan besar beban maksimum yang diterima dan *ring* pengunci untuk mengetahui setiap perubahan panjang sehingga diketahui regangan dan tegangan yang terjadi pada setiap pembebanan dengan persamaan (1) dengan S1 adalah nilai regangan sebesar 0,00005 (MPa), S2 adalah nilai 40% dari kuat tekan maksimum (kN), dan ϵ_2 adalah regangan longitudinal dari S2 (MPa).

$$E = \frac{S2 - S1}{\epsilon_2 - 0.00050} \quad (1)$$

Hasil pengujian *slump flow* dan *L-box* dapat dilihat pada Tabel 6.

Nilai pengujian *slump flow* pada HVFA-SCC dengan substitusi *steel slag* (HS-S) mendapatkan diameter 693,33 mm, sedangkan HVFA-SCC tanpa penambahan *steel slag* (HS-N) mendapatkan nilai lebih rendah yaitu 658,33

mm. Keduanya memenuhi standar beton SCC berdasarkan (EPG, 2005). Hasil menunjukkan substitusi *steel slag* sebanyak 20% menghasilkan *slump flow* yang lebih besar karena sifat *steel slag* yang mempunyai nilai absorpsi yang lebih kecil (lihat Tabel 3).

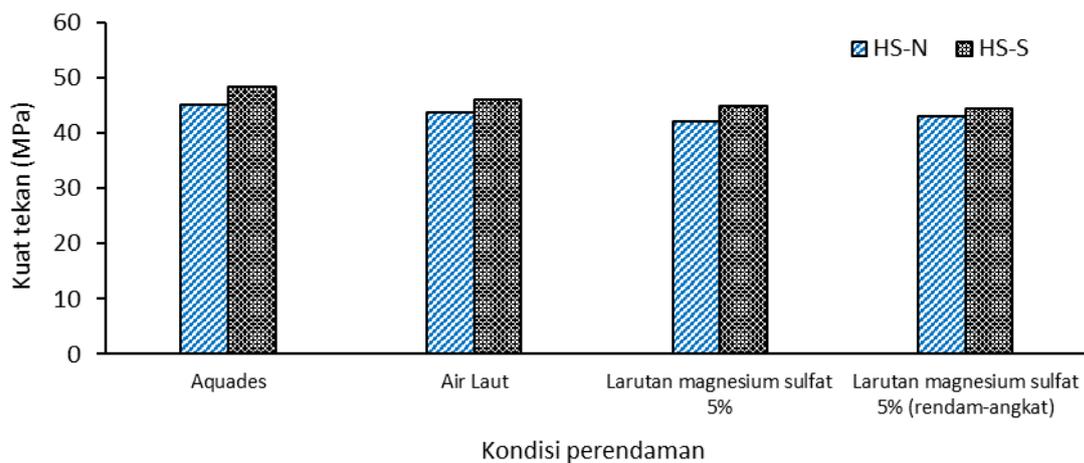
Nilai pengujian *L-box* menunjukkan bahwa substitusi *steel slag* sebanyak 20% menghasilkan nilai *passing ability* yang lebih tinggi sebesar 0,88 dibandingkan tanpa *steel slag* yang bernilai 0,81. Namun keduanya masih memenuhi standar SCC berdasarkan (EPG, 2005). Hal ini dikarenakan nilai keausan *steel slag* lebih tinggi daripada agregat kasar alam (lihat Tabel 3). Agregat *steel slag* memiliki kemungkinan menjadi bongkahan yang lebih kecil dalam proses pengadukan beton dengan alat *mixer*.

3.2 Kuat tekan beton setelah serangan sulfat

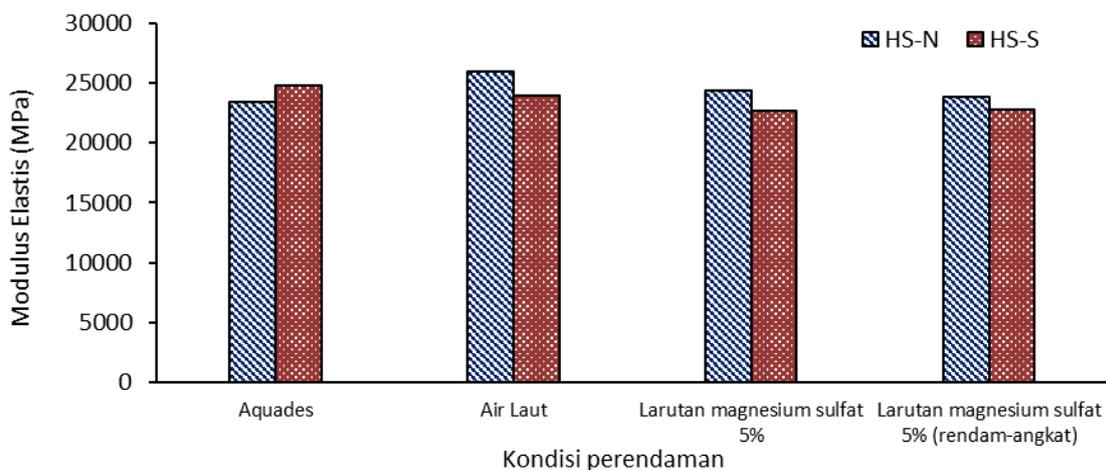
Pengujian kuat tekan beton dilakukan saat beton berumur 28 hari. Sampel dengan

rancang campur beton HS-N dan HS-S divariasikan melalui 4 jenis metode perendaman dan hasilnya disajikan pada Gambar 1. Kuat tekan pada rancang campur HS-N berturut-turut sebesar 45,1 MPa, 43,8 MPa, 42,1 MPa dan 43,0 MPa untuk kondisi perendaman aquades, air laut, larutan magnesium 5% dan larutan magnesium 5% (rendam-angkat). Kuat tekan untuk rancang campur HS-S berturut-turut sebesar 48,3 MPa; 46,1 MPa; 44,9 MPa; dan 44,5 MPa untuk kondisi yang sama.

Seluruh sampel menunjukkan kuat tekan rata-rata di atas 35 MPa. Seluruh sampel merupakan HVFA-SCC dengan kandungan bahan *fly ash* sebagai material pozolan sehingga memiliki kandungan silika dan alumina yang akan mengeras jika bereaksi dengan air dan kalsium hidroksida hasil hidrasi semen. Hal ini menunjukkan substitusi *fly ash* pada HVFA-SCC mampu memberikan performa yang baik pada kuat tekan beton.



Gambar 1. Hasil pengujian kuat tekan beton



Gambar 2. Hasil pengujian modulus elastisitas

Pengaruh penggunaan *steel slag* juga menunjukkan peningkatan pada nilai kuat tekan yang ditunjukkan pada Gambar 1. Penambahan 20% *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar pada rancang campur HS-S mampu meningkatnya kuat tekan beton karena *steel slag* yang berbentuk padat dan berpori namun tidak bersifat *porous* sehingga penyerapan air oleh *steel slag* menjadi cukup rendah, hal tersebut menyebabkan porositas yang terjadi pada beton dengan penambahan 20% *steel slag* dapat tereminilasi lebih baik dibandingkan dengan beton tanpa penambahan *steel slag* (HS-N). Seluruh rancang campur HS-S memiliki nilai kuat tekan lebih tinggi dibandingkan rancang campur HS-N pada seluruh jenis metode perendaman. Oleh sebab itu dapat disimpulkan bahwa *steel slag* mampu meningkatkan performa beton pada kondisi serangan sulfat yang divariasikan dalam 4 jenis perendaman tersebut.

Performa beton SCC dengan substitusi *steel slag* telah diteliti oleh Adiwijaya dkk., (2021); Ahmad dkk., (2023) yang menunjukkan hal yang sama dimana *steel slag* bisa digunakan dalam beton SCC dan menunjukkan performa yang baik pada kuat tekan maupun kuat gesernya. Namun penelitian terkait substitusi *steel slag* pada HVFA-SCC belum banyak ditemukan.

Salah satu penelitian terkait pengaruh *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar pada HVFA-SCC diteliti oleh (Handayani dkk., 2022) untuk mengetahui performa beton dibawah serangan klorida. Berbeda dengan penelitian tersebut, artikel ini meneliti tentang performa beton dibawah serangan sulfat. Keduanya menunjukkan bahwa substitusi *steel slag* pada HVFA-SCC mampu meningkatkan performa beton dalam kondisi serangan kimia.

HVFA-SCC sendiri telah diketahui mampu menahan serangan sulfat maupun klorida dibandingkan beton konvensional. Kumar dkk., (2022) melaporkan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai binder pada HVFA mampu menahan serangan klorida secara efektif dengan prosentase *fly ash* minimal 30% pada binder beton. Penggunaan HVFA juga mampu meningkatkan performa beton yang menggunakan agregat kasar daur ulang pada SCC. Kumar dkk., (2022) melaporkan bahwa ketika beton SCC menggunakan agregat kasar daur ulang beton bekas maka serangan klorida

meningkat, namun dapat ditangani jika menggunakan HVFA-SCC. Hal ini karena penggunaan *fly ash* pada binder mampu menurunkan pori-pori beton dan mencegah serangan klorida terjadi.

Alih-alih menggunakan agregat daur ulang yang menurunkan durabilitas pada beton, penelitian ini menggunakan *steel slag* yang cukup mampu meningkatkan durabilitas beton. (Sosa dkk., 2022) melaporkan bahwa penggunaan *steel slag* pada SCC dapat meningkatkan durabilitas beton pada nilai rangkai, kejutan termal, serangan karbonasi, dan tes abrasi dibandingkan menggunakan agregat kasar alami biasa. Abendeh & Bani Baker (2022) juga melaporkan hal sama dimana penggunaan *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar meningkatkan durabilitas beton terhadap penetrasi serangan sulfat dan uji *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), serta menurunkan kehilangan massa (*mass loss*) setelah uji pembekuan dan pencairan. Namun kedua penelitian tersebut masih menggunakan SCC biasa, berbeda dengan penelitian pada artikel ini yang menggunakan *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar pada HVFA-SCC.

Berdasarkan pembahasan yang telah dijelaskan maka dapat diambil kesimpulan bahwa penggunaan *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar pada HVFA-SCC dapat dijadikan alternatif material konstruksi beton tahan serangan sulfat. Selain itu, pemanfaatan *steel slag* dan *fly ash* pada HVFA-SCC diharapkan mampu mengurangi penggunaan semen dan agregat kasar sebagai material konstruksi dan mampu berdampak pada lingkungan.

3.3 Konsentrasi sulfat terhadap kuat tekan beton

Pengaruh metode perendaman juga ditinjau pada penelitian ini. Air laut yang digunakan memiliki kandungan sulfat hingga 2,7 mg/l, nilai ini lebih rendah daripada larutan magnesium sulfat 5% yaitu sebesar 39,9 mg/l. Konsentrasi sulfat yang lebih tinggi menyebabkan penurunan nilai kuat tekan beton HVFA-SCC dengan *steel slag* (HS-S) maupun tanpa *steel slag* (HS-N). Nilai kuat tekan menurun karena ion sulfat (SO_4^{2-}) sulfat menyerang kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai produk hidrasi kalsium silikat. Reaksi sulfat dengan

kalsium hidroksida dan kalsium silikat hidrat membentuk *gypsum* yang merupakan salah satu senyawa penyebab kerusakan beton akibat sifatnya yang ekspansif, sehingga mendesak dan merusak ikatan antar partikel penyusun beton.

Penurunan kuat tekan yang cukup signifikan antara benda uji variasi perendaman air laut dan magnesium sulfat membuktikan bahwa konsentrasi sulfat yang terkandung pada larutan perendam mempengaruhi kuat tekan beton. Hal ini terjadi karena dengan konsentrasi larutan sulfat yang lebih tinggi, pembentukan senyawa yang bersifat ekspansif dan merusak seperti gypsum dan ettringite lebih cepat, sehingga memperbesar penurunan kuat tekan. Penurunan kuat tekan pada variasi perendaman larutan sulfat dengan perendaman larutan sulfat metode rendam angkat tidak terlalu signifikan dikarenakan periode perendaman yang singkat. Penurunan kuat tekan yang lebih tinggi akibat metode rendam angkat ini diakibatkan oleh kristalisasi garam sulfat yang telah memasuki rongga-rongga dalam beton. Ketika beton diangkat, air sebagai media pelarut magnesium sulfat akan menguap sehingga meninggalkan magnesium sulfat dalam bentuk padat pada rongga-rongga beton. Selanjutnya, hal tersebut akan terus berulang dan meninggalkan deposit magnesium sulfat dalam jumlah yang lebih banyak sehingga mempercepat terjadinya serangan sulfat.

Pengaruh konsentrasi sulfat terhadap nilai porositas beton SCC dengan substitusi *steel slag* juga diteliti oleh (Wu dkk., 2023) yang menyimpulkan bahwa kenaikan konsentrasi akan meningkatkan porositas beton dan untuk mencegah serangan sulfat yang lebih ekspansif diusulkan untuk meningkatkan ketebalan selimut beton.

3.4 Modulus elastisitas beton

Nilai modulus elastis beton ditunjukkan pada Gambar 2 dan Tabel 5. Benda uji HS-S pada kondisi normal memiliki nilai modulus elastis yang lebih tinggi dibanding HS-N, hal ini sejalan dengan teori bahwa nilai modulus elastis akan semakin tinggi jika kuat tekan juga tinggi. Namun terjadi anomali pada benda uji yang direndam dengan air laut dan magnesium sulfat dimana nilai modulus elastis HS-S cenderung lebih rendah dibandingkan dengan HS-N

padahal nilai kuat tekannya lebih tinggi. Dugaan penurunan ini terjadi karena nilai deformasi regangan yang besar pada benda uji akibat penambahan *steel slag*. Nilai keausan agregat dari *steel slag* yang lebih rendah dibandingkan agregat alami kerikil memungkinkan menjadi penyebab deformasi regangan yang besar. Akan tetapi, berat jenis *steel slag* yang lebih tinggi daripada agregat kerikil mampu memberikan performa yang lebih baik dan memberikan nilai kuat tekan yang lebih tinggi.

Tabel 5. Hasil pengujian modulus elastisitas

Kode Sampel	Modulus elastisitas (MPa)			ΔL pada pembebanan 250 kN (mm)
	Eksperimental Pers (1)	Validasi ($E=4700\sqrt{f'_c}$)	Selisih (%)	
HS-S1	23380,6	31565,1	25,93	0,74
HS-N1	24759,8	32668,6	24,21	0,76
HS-S2	25984,8	30490,4	14,78	0,85
HS-N2	23964,8	31366,4	23,60	0,76
HS-S3	24399,7	30708,4	20,54	0,80
HS-N3	22716,9	31492,6	27,87	0,72
HS-S4	23837,7	31099,6	23,35	0,77
HS-N4	22824,9	31697,0	27,99	0,72

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa:

1. Nilai *slumpflow* dan *L-box* untuk sampel HVFA-SCC dengan substitusi *steel slag* 20% dari agregat kasar memiliki *workability* yang lebih tinggi dibandingkan sampel HVFA-SCC tanpa substitusi *steel slag*.
2. Penggunaan *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar pada HVFA-SCC memberikan nilai kuat lebih tinggi pada seluruh kondisi skenario serangan sulfat jika dibandingkan dengan HVFA-SCC tanpa *steel slag*.
3. Hal ini dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan *fly ash* sebagai substitusi semen dan *steel slag* sebagai substitusi agregat kasar pada HVFA-SCC mampu meningkatkan ketahanan beton terhadap serangan sulfat dan material ini dapat dijadikan sebagai alternatif dalam pembuatan beton tahan serangan sulfat.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Universitas Muhammadiyah Surakarta yang telah mendanai penelitian ini melalui skema PID tahun 2022. Terima kasih kami ucapkan kepada Denny Vitasari, S.T., M.Eng.Sc., Ph.D. atas diskusi untuk pengembangan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Rahman, R. F., Asrah, H., Rizalman, A. N., & Mirasa, A. K. (2023). Effect of Spent Bleaching Earth Ash on Sulphate Attack Resistance Of Concrete. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.054>
- Abendeh, R. M., & 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), 925–939.
<https://doi.org/10.1680/jstbu.20.00067>
- Adiwijaya, Datu, I. T., & Khairil. (2021). Applicability of Steel Slag as Replacement Aggregate on Characteristic of Self-Compacting Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 871(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/871/1/012017>
- Ahmad, S., Upadhyay, S., Umar, A., & Al-Osta, M. A. (2023). Effect of Recycled Crushed Glass and Recycled Coarse Aggregate on The Properties of Self-Compacting Concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02532>
- Aliyah, F., Kambali, I., Setiawan, A. F., Radzi, Y. M., & Rahman, A. A. (2023). Utilization of Steel Slag from Industrial Waste for Ionizing Radiation Shielding Concrete: A Systematic Review. *Dalam Construction and Building Materials (Vol. 382)*. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131360>
- Allahverdi, A., & Škvára, F. (2000). Acidic Corrosion of Hydrated Cement Based Materials Part 2. - Kinetics of the Phenomenon and Mathematical Models. *Ceramics - Silikaty*, 44(4), 152–160.
- Amin, A. M., Mahfouz, S. Y., Tawfic, A. F., & Ali, M. A. E. M. (2023). Experimental Investigation on Static/Dynamic Response And γ/n Shielding of Different Sustainable Concrete Mixtures. *Alexandria Engineering Journal*, 75, 465–477.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.06.010>
- Awoyera, P. O., Olofinnade, O. M., Ayobami, A., Akinwumi, I. I., & Oyefesobi, M. (2016). Performance of Steel Slag Aggregate Concrete with Varied Water-Cement Ratio. *Jurnal Teknologi*, 10, 125–131.
- Biro Perencanaan-Setjen KKP. (2021). Rencana Strategis Kementerian Kelautan dan Perikanan Tahun 2021-2024.
- Deepak, M., Ramalinga Reddy, Y., & Nagendra, R. (2023). Investigating The Mechanical Strength, Durability and Micro-Structural Properties of Slag-Based Concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(10), 272. <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01234-2>
- Dey, S., Anurag, A., & Praveen Kumar, V. V. (2022). An Experimental Study on Strength and Durability Properties of Concrete with Partial Replacement of Aggregate with Ferrochrome Slag. *Architecture, Structures and Construction*, 2(3), 335–347.
<https://doi.org/10.1007/s44150-022-00072-7>
- EPG. (2005). ERMCO The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *The European Guidelines for Self Compacting Concrete*, May.

- Handayani, N. K., Darmawan, B., & Nugroho, F. L. A. (2022). Pengaruh Substitusi Steel Slag Terhadap Sifat Mekanik High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete Pada Variasi Konsentrasi Perendaman Klorida. *Symposium Nasional RAPI XXI*, 5(Gambar 1), 171–176.
- Indriyanto, L. A., Saputra, A., & Sulisty, D. (2020). Pengaruh Air Laut Pada Masa Perawatan Terhadap Infiltrasi Ion Klorida Pada Beton Dengan Penambahan Fly Ash 12,5%. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 3(2), 61. <https://doi.org/10.20961/jrrs.v3i2.40955>
- Kumar, S., Kapoor, K., Singh, S. P., Singh, P., & Sharma, V. (2022). A Review on The Properties of Natural and Recycled Coarse Aggregates Concrete Made with Different Coal Ashes. *Cleaner Materials*, 5(June), 100109. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100109>
- Lie, H. A., & Narayudha, M. (2008). Steel-Slag as Aggregate Substitute's Influence to Concrete's Shear Capacity an Experimental Approach. *Test*, 1–8.
- Madhavi, T. Ch., Raju, L. S., & Mathur, D. (2014). Durability and Strength Properties of High Volume Fly Ash Concrete. *Journal of Civil Engineering Research*, 4(2A), 7–11. <https://doi.org/10.5923/c.jce.201401.02>
- Patnaikuni, I., Setunge, S., Solikin, M., Ling, X., & Boina, B. (2013). High Strength High Volume Fly Ash Concrete. 805–810. https://doi.org/10.3850/978-981-07-5354-2_m-62-464
- Solikin, M., Basuki, & Setiawan, B. (2013). The Utilization of Self Compacting Concrete (SCC) in Producing Hollow Concrete Panel Wall to Provide Rapid Shelter for Post Disaster Srea. *Procedia Engineering*, 54(2004), 742–751. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.068>
- Solikin, M., & Setiawan, B. (2017). The Effects of Design Strength, Fly Ash Content and Curing Method on Compressive Strength of High Volume Fly Ash Concrete: A Design of Experimental. *MATEC Web of Conferences*, 103, 1–8. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710301003>
- Sosa, I., Thomas, C., Polanco, J. A., Setién, J., Sainz-Aja, J. A., & Tamayo, P. (2022). Durability of High-Performance Self-Compacted Concrete Using Electric Arc Furnace Slag Aggregate and Cupola Slag Powder. *Cement and Concrete Composites*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104399>
- Wardhono, A. (2021). Flowability And Strength Properties of High Volume of Fly Ash Material on Self-Compacting Concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, 1747(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1747/1/012033>
- Wijaya, R. A., Wijayanti, S., Astuti, Y., Kimia, D., Sains, F., & Diponegoro, U. (2021). Fly Ash Limbah Pembakaran Batubara sebagai Zat Mineral Tambahan (Additive) untuk Perbaikan Kualitas dan Kuat Tekan Semen. 27(1), 127–134.
- Wu, T., Jin, L., Fan, T., Qiao, L., Liu, P., Zhou, P., & Zhang, Y. (2023). A Multi-Phase Numerical Simulation Method for The Changing Process of Expansion Products on Concrete Under Sulfate Attack. *Case Studies in Construction Materials*, 19. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02458>