

PENGGUNAAN COPPER SLAG SEBAGAI SUBTITUSI AGREGAT HALUS DAN PENAMBAHAN SIKAS VISCOCRETE 8048 PADA HIGH VOLUME FLY ASH SELF COMPACTING CONCRETE (HVFA-SCC) TERHADAP KUAT TEKAN

Savira Ayu Candrika¹, Anggi Rahmad Zulfikar²

¹Mahasiswa D4 Teknik Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya.

²Dosen D4 Teknik Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya.

Email: savira.20044@mhs.unesa.ac.id, anggizulfikar@unesa.ac.id

Abstrak

Konsep teknologi Self Compacting Concrete yang dipadukan dengan penggunaan fly ash dengan presentase tinggi atau High Volume Fly ash (HVFA) terbukti mampu meningkatkan kuat tekan beton. Peningkatan kuat tekan beton dapat diperoleh dari pemanfaatan limbah peleburan tembaga atau copper slag sebagai pengganti agregat halus yang mampu meningkatkan kekuatan beton. Metode eksperimen digunakan dalam penelitian ini dengan membuat benda uji silinder 150 x 300 mm di laboratorium, untuk mengetahui nilai kuat tekan HVFA-SCC serta variasi optimum penggunaan copper slag pada agregat halus dengan target mutu $f'c$ 30 MPa. Workability diuji melalui slump flow dan V-funnel. Pengumpulan data kuat tekan beton dilakukan pada umur 14 hari setelah direndam menggunakan air PDAM. Kadar variasi substitusi copper slag dimulai dari 0%, 10%, 20%, 30% dari berat agregat halus dan kadar pengganti fly ash sebesar 50% dari berat semen. Dihasilkan data dari pengujian kuat tekan bahwa variasi 0%, 10%, dan 20% copper slag pada HVFA-SCC 50% mampu memberikan peningkatan kuat tekan beton, dan variasi optimum terjadi pada variasi 20% copper slag sebesar 38,57 MPa.

Kata Kunci: Copper Slag, HVFA-SCC, Kuat Tekan

Abstract

The concept of Self-Compacting Concrete technology, combined with the use of high-volume fly ash (HVFA), has been proven to enhance the compressive strength of concrete. This increase in strength also be achieved through the utilization of copper slag, a by-product of copper smelting, as a fine aggregate replacement. This research employed an experimental method, creating cylindrical specimens of 150 x 300 mm in laboratory to evaluate the compressive strength of HVFA-SCC and determine the optimum variation of copper slag replacement in fine aggregates, targeting a concrete strength of $f'c$ 30 MPa. Workability was tested using the slump flow and V-funnel methods. Compressive strength data were collected at the age of 14 days after curing in PDAM water. The substitution variations of copper slag were set at 0%, 10%, 20%, and 30% of fine aggregate requirement, while fly ash replaced 50% of cement requirement. The compressive strength tests results indicated that substitutions of 0%, 10%, and 20% in 50% HVFA-SCC improved concrete strength, with the optimum variation achieved at 20% copper slag, resulting in a compressive strength of 38.57 MPa.

Keywords: Copper Slag, HVFA-SCC, Compressive Strength

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pesatnya perkembangan industri konstruksi saat ini menjadikan beton salah satu material utama dalam pembangunan. Penggunaan beton sebagai bahan utama dalam pembangunan konstruksi terus meningkat, sehingga kebutuhan material penyusunnya juga ikut bertambah. Hal ini secara perlahan dapat memengaruhi ketersediaan sumber daya alam yang terbatas dan memicu kenaikan harga

material konstruksi. Dampak paling besar dirasakan pada material semen, karena produksinya yang masif dan berkelanjutan berpotensi merusak keseimbangan lingkungan. Berdasarkan data dari laman Bina Konstruksi, pada tahun 2019 produksi semen di Indonesia mencapai 109.907.400 ton/tahun. Fakta ini menunjukkan betapa pentingnya mencari solusi alternatif untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. Fly ash digunakan sebagai alternatif karena ketersediaannya yang

melimpah, sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan perekat sebagian semen untuk diaplikasikan dalam pembuatan beton dengan kadar *fly ash* diatas 50% (Manuahe et al., 2014).

Pekerjaan konstruksi beton, khususnya pada beton bertulang konvensional, memerlukan proses pemadatan atau vibrasi untuk memastikan kualitas beton. Proses pemadatan merupakan langkah penting dalam pembuatan beton untuk memastikan kualitasnya tetap optimal. Tujuan dari pemadatan adalah untuk mengurangi udara yang terperangkap dalam beton segar sehingga dihasilkan beton yang homogen dan bebas dari rongga. Dengan demikian, struktur beton yang dihasilkan akan memiliki kekuatan dan daya tahan yang lebih baik dalam jangka panjang. Teknologi beton memadat sendiri atau *Self compacting concrete* dapat dijadikan alternatif permasalahan dalam pemadatan beton.

Penyusun beton dari bahan yang terdiri dari agregat halus, agregat kasar, semen serta *fly ash* yang berfungsi sebagai bahan pengikat hidrolis (Pangestu & Adi, 2021). Komponen-komponen tersebut dicampur dalam *mix design* tertentu untuk menghasilkan mutu beton yang baik, mudah diaplikasikan, dan mempunyai kekuatan yang tinggi. Salah satu inovasi dalam pembuatan beton adalah dengan menambahkan bahan tambah mineral, yang dirancang untuk meningkatkan performa beton secara keseluruhan. Contohnya, slag yang dihasilkan dari berbagai proses industri, termasuk peleburan tembaga, dapat dimanfaatkan sebagai bahan alternatif untuk menggantikan sebagian material dalam beton. Penggunaan bahan ini tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga mendukung konsep pembangunan yang lebih berkelanjutan.

Sifat fisik yang dimiliki *copper slag* menyerupai dengan agregat alami, seperti tekstur kasar dan berpori, yang memberikan daya ikat yang baik terhadap pasta semen. Penelitian oleh Gupta & Siddique (2019) telah terbukti bahwa tekstur serta karakteristik penyerapan air yang rendah dapat meningkatkan sifat segar beton sehingga dapat digunakan sebagai substitusi agregat halus pada beton SCC. Penggunaan *copper slag* dalam proyek infrastruktur dianggap ramah lingkungan karena dapat mengurangi ketergantungan pada material agregat alami serta menekan volume limbah industri. Didukung dengan penelitian sebelumnya yakni kemampuan kerja beton meningkat hingga mencapai 40-50% seiring dengan bertambahnya persentase variasi *copper slag* sebagai pengganti agregat halus (Al-Jabri et al., 2011).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menentukan variasi optimum *copper slag* sebagai bahan pengganti agregat halus pada beton memadat sendiri dengan kadar *fly ash* yang tinggi yakni 50%, dengan *admixture* Sika Viscocrete 8048 sebesar 1% untuk mengetahui pengaruh *workability*, dan kuat tekan pada variasi limbah *copper slag* sebesar 0%, 10%, 20%, 30% pada campuran beton.

Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh pada variasi *copper slag* terhadap *workability* dalam beton HVFA-SCC?
2. Berapa besar kekuatan tekan pada masing-masing variasi *copper slag* pada HVFA-SCC?
3. Berapa variasi *copper slag* paling optimum pada HVFA-SCC?

Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui kemampuan *workability* pada HVFA-SCC.
2. Untuk memperoleh besar kekuatan tekan pada masing-masing variasi *copper slag* pada HVFA-SCC.
3. Untuk mengetahui berapa variasi *copper slag* yang paling optimum pada HVFA-SCC.

KAJIAN PUSTAKA

Beton Memadat Sendiri (*Self Compacting Concrete*)

Konsep jenis beton SCC adalah jenis beton segar yang dapat dengan mudah mengalir sendiri, mengisi ruang keseluruhan cetakan beton tanpa menggunakan alat bantu *vibrator*. Beton memadat sendiri harus memiliki karakteristik homogen, kohesif, bebas dari segregasi, blocking, dan bleeding. Beton dapat dikategorikan *Self Compacting Concrete* (SCC) jika memenuhi sifat-sifat tertentu, seperti *flowability*, *fillingability*, *passingability*, dan *segregation*.

High Volume Fly Ash (HVFA)

Beton dengan kadar *fly ash* lebih dari 50% dari berat semen atau *High Volume Fly Ash* adalah jenis beton yang dapat meningkatkan berbagai aspek kinerja beton, seperti, *workability*, *flowability*, *fillingability*, *passingability*, serta mengurangi panas hidrasi dan meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat, *alkalisilica reactivity* (Alisiyah et al., 2019). Penelitian oleh Budi et al. (2020) menunjukkan bahwa HVFA 50% pada beton memadat sendiri SCC

menghasilkan beton segar yang memiliki *workability* baik dan dapat diterapkan dalam desain campuran beton.

Berdasarkan ASTM C618 (2019), limbah *fly ash* (abu terbang) terbagi menjadi dua jenis, yaitu Kelas F dan Kelas C. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada kandungan kalsium, silika, aluminium dan besi. *Fly ash* kelas F diperoleh dari pembakaran batu bara antrasit dan bituminus. *Fly ash* kelas C mengandung kapur atau kalsium hidroksida (CaO) yang signifikan dan memiliki sifat layaknya semen, *fly ash* kelas ini didapatkan dari produksi dari batu bara lignit dan sub-bituminus.

Copper Slag

Copper slag dengan karakter fisik yang dimilikinya, berbentuk runcing, halus, pipih, dan tajam. Jenis *copper slag* dapat dibedakan dari sifat dan karakteristik *copper slag*. Perbedaan tersebut disebabkan pada proses pendinginan. Jenis pertama *copper slag*, yakni *air-cooled* berbentuk kristal, jenis ini diperoleh dari hasil proses pendinginan dengan suhu lingkungan. Jenis kedua *copper slag* yang memiliki kandungan kimia sebagian besar besi oksida dan silikat, yakni berbentuk butiran halus, jenis ini diperoleh pada saat proses pendinginan air di dalam alat granulator.

Pengganti agregat halus menggunakan *copper slag* dinilai cocok untuk diaplikasikan pada pembuatan beton, ditinjau karakteristik *copper slag* berbutir, halus, dan tajam (Gupta & Siddique, 2019). Mengingat bahwa *copper slag* cocok untuk diaplikasikan pada campuran beton maka dapat dikatakan *copper slag* dapat dijadikan untuk pengganti bahan pengisi beton seperti semen dan agregat halus (Dzikri & Firmansyah, 2018).



Gambar 1. *Copper Slag*

Sumber: Dokumentasi Pribadi

Kuat Tekan

Pengujian kekuatan beton adalah kemampuan beton untuk menahan gaya aksial per satuan luas. Untuk mengukur nilai kuat tekan dapat menggunakan mesin uji tekan CTM

(*Compression Testing Machine*). Hasil kuat tekan pada beton akan meningkat sesuai dengan bertambahnya umur beton. Standar kuat tekan beton ditetapkan waktu beton berumur 28 hari. Kekuatan beton seiring bertambahnya umur beton dapat dilihat pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Kuat Tekan Beton Berdasarkan Umur Beton

Kuat Tekan (%)	40	65	88	95	100	120	135
Umur Beton (Hari)	3	7	14	21	28	90	365

Sumber: PBI 1971

Kuat tekan beton dihitung melalui persamaan sebagai berikut,

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Keterangan:

f'c = Kekuatan tekan beton (MPa)

P = Beban maksimum yang diterima (N)

A = Luas penampang benda uji (mm)

METODE

Jenis penelitian yang dilakukan bersifat eksperimen menggunakan teknologi beton memadat sendiri atau *self compacting concrete* dengan campuran bahan pengikat *fly ash* sebagai substitusi semen serta *copper slag* sebagai substitusi agregat halus. Penelitian dilakukan dengan membuat benda uji berbentuk silinder 150 x 300 mm di laboratorium dengan jumlah sampel per variasi sebanyak 3 benda uji. Tujuan penelitian untuk mengetahui nilai kuat tekan HVFA-SCC pada umur 14 hari setelah direndam dengan air PDAM, dan target mutu f'c 30 MPa. Pengukuran beton segar terhadap *workability* menggunakan uji *slump flow* untuk mengetahui *flowability* dan *V-funnel* untuk *fillingability*.

Adapun tempat dan waktu penelitian yang penulis laksanakan yaitu pada Bulan November di Laboratorium beton PT. Solusi Bangun Beton.

Variabel dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Variabel independen

Variabel independen dalam penelitian beton memadat sendiri berupa substitusi agregat halus menggunakan *copper slag* dengan variasi 10%, 20%, 30%.

2. Variabel terikat

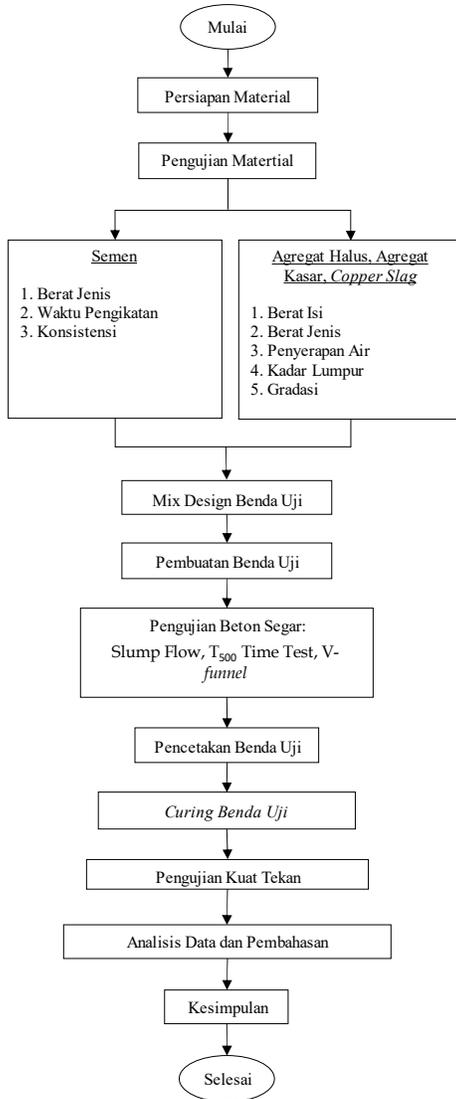
Variabel terikat berupa hasil pengujian kuat tekan beton memadat sendiri.

3. Variabel kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian beton memadat sendiri ini berupa pengganti semen

dengan *Fly Ash* kelas C 50%, *Sika Viscocrete* 8048 sebanyak 1%.

Berikut adalah uraian prosedur penelitian yang dirancang untuk memberikan gambaran umum secara sistematis dari tahapan awal hingga akhir penelitian. Prosedur ini disajikan dalam bentuk diagram alir yang mencakup langkah-langkah utama pelaksanaan penelitian. Adapun diagram alir tersebut dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Material

1. Semen

Semen yang digunakan dalam penelitian beton memadat sendiri berupa semen Dynamix OPC Tipe I.

Tabel 2. Hasil Uji Semen

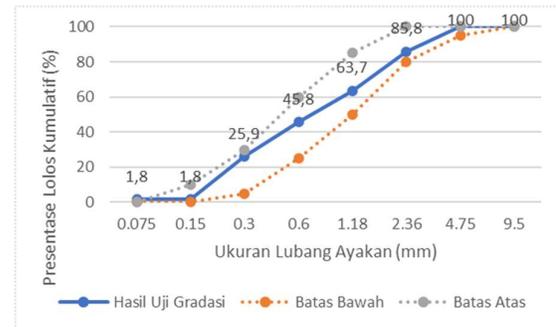
No.	Jenis Uji	Hasil Pengujian
1.	Konsistensi Normal	28,4 %
2.	Waktu Ikat	
-	Pengikatan Awal	46 menit
-	Pengikatan Akhir	140 menit
3.	Berat Jenis	3,03 gr/cc

2. Agregat Halus

Agregat halus (pasir) menggunakan jenis pasir Lumajang. Pengujian pasir dilakukan di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton.

Tabel 3. Hasil Uji Agregat Halus

No.	Jenis Uji	Hasil Pengujian
1.	Berat Isi (gr/cm^3)	1,65 gr/cm^3
2.	Berat Jenis (gr/cm^3)	2,77 gr/cm^3
3.	Penyerapan Air (%)	1,01%
4.	Kadar Lumpur (%)	0,08%



Gambar 3. Hasil Uji Gradasi Agregat Halus

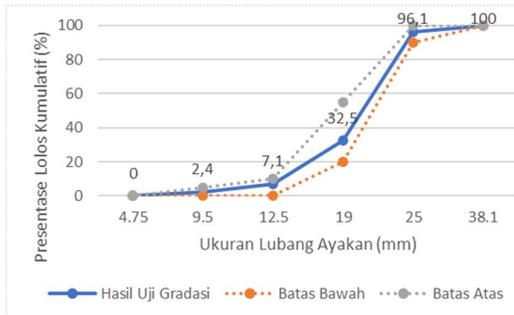
Grafik hasil uji gradasi agregat halus yang tertera pada gambar 3 yang, menunjukkan bahwa pasir termasuk kategori pada zona II yang merupakan pasir dengan kategori sedang. Berdasarkan ASTM C33/C33M (2008), agregat halus yang baik harus masuk kedalam zona gradasi yang ditentukan. Modulus kehalusan didapat sebesar 2,77 yang telah memenuhi syarat dengan batasan nilai modulus kehalusan 1,5 hingga 3,8 berdasarkan SK SNI S-04-1989-F.

3. Agregat Kasar

Agregat kasar (batu pecah) yang digunakan dalam penelitian ini berupa batu pecah Jeladri. Pengujian batu pecah dilakukan di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton.

Tabel 4. Hasil Uji Agregat Kasar

No.	Jenis Uji	Hasil Pengujian
1.	Berat Isi (gram/cm^3)	1,54
2.	Berat Jenis (gram/cm^3)	2,77
3.	Penyerapan Air (%)	1,07
4.	Kadar Lumpur (%)	1



Gambar 4. Hasil Uji Gradasi Agregat Kasar

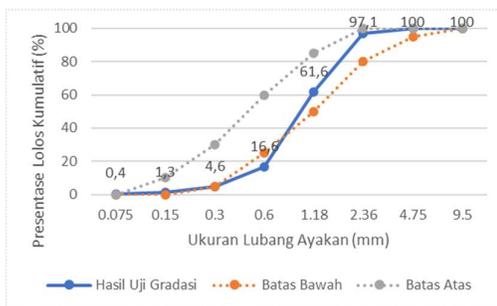
Grafik hasil uji gradasi agregat kasar yang tertera pada gambar 4 yang, menunjukkan bahwa batu pecah masuk kedalam zona gradasi yang ditentukan, sehingga batu pecah sudah memenuhi syarat gradasi berdasarkan Gradasi No. 5 ASTM C-33. Modulus kehalusan didapat sebesar 2,77 yang telah memenuhi syarat dengan batasan nilai modulus kehalusan 6,0-7,1 berdasarkan SK SNI S-04-1989-F.

4. Copper Slag

Copper Slag sebagai substitusi agregat halus sebagian pasir berupa limbah peleburan tembaga dari PT. Smelting Gresik.

Tabel 5. Hasil Uji *Copper Slag*

No.	Jenis Uji	Hasil Pengujian
1.	Kadar Lumpur (%)	0,3
2.	Berat Jenis (gram/cm ³)	3,49
3.	Penyerapan Air (%)	0,5
4.	Berat Isi (gram/cm ³)	1,82



Gambar 5. Hasil Uji Gradasi *Copper Slag*

Hasil pengujian terhadap *copper slag* menunjukkan bahwa material ini termasuk kategori zona II dan memiliki sifat fisik dan karakteristik yang serupa dengan pasir, seperti bentuk permukaan yang pipih dan tajam. Kandungan lumpur dalam penggunaan material penyusun beton tidak boleh melebihi dari 5% (SNI 04-1989-F). Dari data yang tertera pada Tabel 5, kadar lumpur pada *copper slag* tercatat sebesar 0,3%, yang

berarti sudah memenuhi batasan yang ditetapkan. Dengan demikian, bahan pengganti sebagian pasir menggunakan *copper slag* dapat dipertimbangkan sebagai alternatif dalam bahan penyusun beton.

Mix Design Beton

Perhitungan komposisi campuran beton memadat sendiri didapatkan dari hasil *trial and error* yang dilakukan terhadap tiga alternatif *mix design* pada beton memadat sendiri. Perbandingan adukan beton dalam 1 m³ yang dilakukan pada penelitian ini tertera pada Tabel 6.

Tabel 6. *Mix Design* Beton per 1 m³

Material	Presentase <i>Copper Slag</i>			
	0%	10%	20%	30%
Semen 50% (Kg)	241	241	241	241
<i>Fly Ash</i> 50% (Kg)	241	241	241	241
Pasir (Kg)	1108	997	886	776
<i>Copper Slag</i> (Kg)	-	111	222	332
<i>Split</i> 12-25 (Kg)	374	374	374	374
<i>Split</i> 10-20 (Kg)	374	374	374	374
Air (Kg)	190	190	190	190
<i>Sika Viscocrete</i> 8048 (L)	4,8	4,8	4,8	4,8

Hasil Pengujian Karakteristik SCC

Karakteristik SCC dapat diketahui dengan melakukan pengujian pada beton segar yang mengacu pada pedoman EFNARC 2005. Hasil dari pengujian karakteristik beton segar SCC ditampilkan dalam Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Beton Segar *Slump Flow*

Jenis	Variasi	<i>Slump Flow</i>	T500 <i>Slump Time</i>
		mm	s
HVFA	C0	670	5,67
	C10	660	5,92
-SCC 50%	C20	650	6,25
	C30	650	7,15

Keterangan:

C0 = 0% *Copper Slag*

C10 = 10% *Copper Slag*

C20 = 20% *Copper Slag*

C30 = 30% *Copper Slag*

Pada Tabel 7, didapatkan hasil pengujian *Slump Flow* dan T₅₀₀, menunjukkan bahwa dengan variasi substitusi *copper slag* sebesar 20% dan 30% berdampak mengurangi diameter *slump flow* dari variasi lainnya, berdasarkan hasil uji

slump flow ini masih memenuhi standar diameter *slump flow* 650-800 mm (EFNARC 2005). Serta untuk hasil uji *slump time* T500 melebihi batas yang ditentukan oleh EFNARC yakni 2-5 detik, terutama pada variasi *copper slag* 20% dan 30%. Hal ini menunjukkan bahwa beton segar mengalami viskositas yang tinggi, yang membuat mengurangi kemampuan beton untuk menyebar secara cepat dan merata. Penurunan *workability* disebabkan oleh *copper slag* memiliki bentuk pertikel yang tajam, kasar, dan permukaan lebih halus dibandingkan pasir alam, yang dapat meningkatkan gesekan antar partikel sehingga menghambat aliran beton.

Selain itu, penggunaan dosis *superplasticizer* 8048 sebesar 1% dinilai kurang optimal sehingga memberikan efek pengurangan *flowability* beton segar, maka dapat dilakukan peningkatan dosis *superplasticizer* diatas 1% dari total binder untuk memperbaiki *flowability* beton segar, seperti penelitian yang dilakukan Gupta & Siddique (2019), menemukan bahwa kombinasi w/c 0,30 dan *superplasticizer* 1,5% menghasilkan kuat tekan tertinggi dalam beton SCC.

Tabel 8. Hasil Pengujian Beton Segar V-funnel

Jenis Beton	Variasi	V-funnel
		s
HVFA-SCC 50%	0% Copper Slag	11,30
	10% Copper Slag	11,45
	20% Copper Slag	11,74
	30% Copper Slag	12,61

Pada Tabel 8, didapatkan hasil uji V-funnel pada Tabel 8, mengacu pada pedoman EFNARC 2005. Dari pedoman yang ada, pengujian V-funnel disyaratkan mengalir pada corong V dengan waktu 6-12 detik. Hasil pengujian didapatkan variasi substitusi *copper slag* 0-20% memenuhi persyaratan pada pedoman yang ada, Pada variasi 30% *copper slag* melebihi batas waktu yang ditentukan yakni sebesar 12,61 detik, hal tersebut diakibatkan partikel *copper slag* yang tajam dan berat, yang dapat mengurangi *filling ability* beton serta dosis *superplasticizer* yang rendah (1%) terhadap kebutuhan air yang dapat meningkatkan viskositas beton.

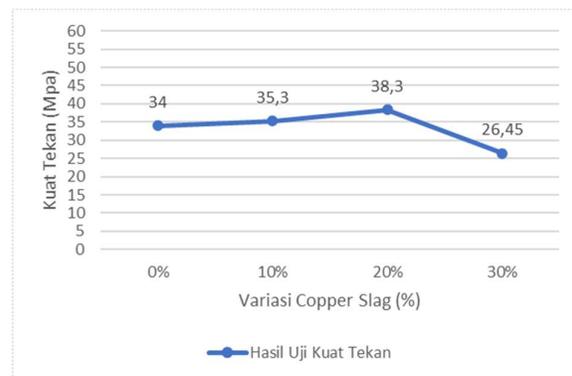
Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Pedoman ASTM C 39/C 39M dijadikan prosedur pengujian dan analisis hasil kuat tekan. Pengukuran nilai kuat tekan beton memadat sendiri dilakukan pada umur 14 hari menggunakan mesin Compressing Testing Machine (CTM) di Laboratorium PT. Solusi Bangun Beton. Mutu beton HVFA-SCC yang

direncanakan yaitu 30 Mpa di umur 28 hari. Hasil uji kuat tekan beton memadat sendiri tertera pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Uji Kuat Tekan Umur 14 Hari

Jenis	Benda Uji	P maks (N)	Luas (mm ²)	f _c (Mpa)	Rata-rata (Mpa)
	C0-1	585800	17662,5	33,1	34,00
	C0-2	616421	17662,5	34,9	
	C0-3	283040	17662,5	16,0	
	C10-1	621720	17662,5	35,2	35,30
	C10-2	658811	17662,5	37,3	
	C10-3	590500	17662,5	33,4	
HVFA-SCC 50%	C20-1	696000	17662,5	39,3	38,57
	C20-2	660578	17662,5	37,4	
	C20-3	688838	17662,5	39,0	
	C30-1	247275	17662,5	14,0	26,45
	C30-2	454800	17662,5	25,7	
	C30-3	482300	17662,5	27,2	



Gambar 6. Hasil Rata-rata Uji Kuat Tekan

Hasil rata-rata uji kuat tekan beton HVFA-SCC disajikan berbentuk grafik pada Gambar 6, bahwa adanya penambahan secara signifikan penggunaan *copper slag* sebagai pengganti bahan pengisi sebagian agregat halus akan meningkatkan nilai kuat tekan. Kuat tekan tertinggi tercapai pada variasi *copper slag* sebesar 20% dengan nilai kekuatan 39,06 MPa. Seperti penelitian yang dilakukan Gupta & Siddique (2019), memiliki pernyataan yang sama yakni semakin tinggi penggunaan kadar *copper slag* yang diaplikasikan pada teknologi beton memadat sendiri, berdampak semakin tinggi juga nilai kuat tekan beton.

Hasil pengujian kuat tekan pada benda uji C0-3 dan C30-1 dianggap tidak memenuhi syarat pengujian disebabkan hasil nilai pengujian yang terlampaui jauh jika dibandingkan dengan benda uji C0-1, C0-2, C30-2, dan C30-3. Nilai yang berbeda jauh ini disebabkan oleh alat Compression Testing Machine yang kurang kalibrasi, didapatkan pernyataan kurangnya kalibrasi dari percobaan beberapa sampel benda

uji yang tidak terpakai dan memiliki hasil kuat tekan yang sama yakni 14 dan 16 Mpa.

Menurut pedoman PBI 1971, pada umur 14 hari beton memiliki kekuatan sebesar 88%, sehingga hasil yang telah didapat variasi C0 hingga C20 mampu mencapai target mutu beton $f_c'30$ MPa. Berbeda dengan variasi C30 yang belum mencapai mutu target yang direncanakan.

Penggunaan *copper slag* sebesar 30% dari berat pasir mengalami penurunan kuat tekan disebabkan karakteristik fisik dan kimia dari *copper slag* itu sendiri. *Copper slag* memiliki sifat partikel yang tajam dan permukaan yang halus, sehingga mengurangi daya rekat antara agregat dan pasta semen. Menurut penelitian Gupta & Siddique (2019), pada memadat sendiri yang menggunakan *copper slag* sebagai pengganti pasir hingga 30%, terjadi peningkatan sifat segar dan kekuatan tekan pada umur tertentu. Namun, ketika proporsi penggantian *copper slag* melebihi 30%, terdapat penurunan kekuatan tekan akibat distribusi partikel yang kurang optimal dan peningkatan porositas dalam struktur beton. Didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan substitusi *copper slag* lebih dari 30% menyebabkan penurunan kekuatan tekan karena terjadinya segregasi dan penurunan ikatan antar partikel agregat (Al-Jabri et al., 2011)

Dengan demikian, meskipun *copper slag* memiliki potensi sebagai pengganti pasir, penggunaannya harus diatur dengan proporsi yang tepat untuk menjaga kualitas dan kinerja beton sesuai standar konstruksi.

SIMPULAN

1. Nilai *slump flow* pada variasi C0, C10, C20 dalam beton HVFA-SCC 50% dapat menurunkan diameter *slump flow* dengan nilai berturut-turut 670, 660, 650 mm. Hasil pengujian T_{500} *slump time*, variasi C0 dan C10 memenuhi syarat EFNARC 2005, sedangkan nilai pada variasi C20 dan C30 sebesar 6,25 dan 7,15 detik, sedikit melebihi batas syarat yang ditentukan. Pada pengujian *V-funnel*, variasi C0, C10, C20 telah memenuhi persyaratan EFNARC 2005 (6-12 detik). Tetapi pada variasi C30, waktu pengujian mencapai 12,61 detik. Hal tersebut menunjukkan viskositas beton yang tinggi yang disebabkan oleh partikel *copper slag* yang tajam dan berat serta dosis superplasticizer yang kurang optimal sehingga dapat menurunkan *workability*

terutama pada *flowability* dan *fillingability* pada beton memadat sendiri.

2. Nilai rata-rata kuat tekan beton HVFA-SCC kadar *fly ash* 50% dengan substitusi *copper slag* 0%, 10%, 20%, 30% secara berturut-turut adalah 34 MPa; 35,30 MPa; 38,57 MPa; 26,45 MPa. Nilai kuat tekan beton mengalami penurunan pada kadar *copper slag* 30% karena *copper slag* memiliki sifat partikel yang tajam dan permukaan yang halus sehingga mengurangi daya rekat antara agregat dan pasta semen.
3. Penggunaan *copper slag* sebagai substitusi pasir pada beton HVFA-SCC dengan kadar *fly ash* 50% mampu meningkatkan nilai kuat tekan beton. Untuk variasi paling optimum dalam penggunaan *copper slag* didapatkan pada variasi 20% dengan nilai kuat tekan sebesar 38,57 MPa.

SARAN

1. Untuk memperoleh *mix design* yang baik, sebaiknya dilakukan kontrol penggunaan dosis *superplasticizer* lebih dari 1% atau sesuai dengan kebutuhan air.
2. Dapat digunakan jenis *superplasticizer* yang berbeda seperti Sika Viscocrete 10 untuk penelitian lanjutan.
3. Pengerjaan pembuatan benda uji sebaiknya dilakukan dengan berhati-hati, dikarenakan permukaan *copper slag* yang tajam dan runcing.
4. Sebaiknya selalu melakukan kalibrasi pada mesin CTM di setiap pengujian benda uji.

REFERENSI

- Al-Jabri, K. S., Al-Saidy, A. H., & Taha, R. (2011). Effect of Copper Slag as a Fine Aggregate on the Properties of Cement Mortars and Concrete.
- Alisiyah, S. R., Budi, A. S., & Safitri, E. (2019). Kajian Tegangan Regangan dan Kuat Tekan Beton HVFA Memadat Sendiri terhadap Beton Normal.
- ASTM C33/C33M-08. (2008). Standard specification for concrete aggregates.
- ASTM C618. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use.
- Brindha, D., & Nagan, S. (2011). Durability Studies on Copper Slag Admixed Concrete.
- Budi, A. S., Sangadji, S., & Kurniawan, R. D. (2020). Kajian Kuat Tekan Uniaksial Beton Memadat Sendiri dengan Kadar Fly Ash 50%.
- Dzikri, M., & Firmansyah, M. (2018). Pengaruh Penambahan Superplasticizer Pada Beton Dengan Limbah Tembaga (Copper Slag) Terhadap Kuat Tekan Beton Sesuai Umurnya.

- Gupta, N., & Siddique, R. (2019). Strength and Micro-structural Properties of Self-Compacting Concrete Incorporating Copper Slag.
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D. J., & Windah, R. S. (2014). Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash). 2(6), 277–282.
- Mulyanto, T. (2015). Analisis Sifat Mekanis Beton SCC Mutu Tinggi dengan Pemanfaatan Teknologi High Volume Fly Ash Concrete.
- Pangestu, & Adi, F. (2021). Studi Perbandingan Penggunaan 3 Merk Semen Dengan Menggunakan Fly Ash Terhadap Mutu Beton.
- PBI. (1971). Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 N.I - 2. Departemen Pekerjaan Umum.