



## Pengaruh Substitusi Semen dengan Semen *Slag* pada *Mortar* terhadap Kebutuhan Air dan Waktu Ikat, dan Peningkatan Kuat Tekan *Mortar* pada Umur 14 hari dan 28 Hari

\*Rudi Yuniarto Adi, Safira Yulia Rizqi, Sie Alexander Patrick Subagyo, Han Ay Lie

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

\*) Rudi Yuniarto Adi

Received: 17 Juli 2020 Revised: 27 Oktober 2020 Accepted: 6 November 2020

### Abstract

*The use of industrial waste as a component of nowadays building material has become of major importance due to the underlining of environmental and sustainability issues. Among these materials is Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), often referred to as slag-cement. The material is a residue produced during the steel refining process. The cementitious nature of the product makes it most suitable for ordinary Portland cement (PC) substitution. However, the behavior of this slag-cement in terms of development time and strength has not been defined in great details. In the construction industry, time is of major importance, a prolonged hydration process could delay the overall process. This research work focused on the setting time and strength response of slag-cement in mortar. The ratio of mortar constituent of cement-to-sand was 1 : 3. The percentage of slag-cement substitute to PC was 0%, 25%, 50% and 75% to the cement weight. The compressive strength was tested at the age of 14 days and 28 days. The results of the analysis showed that at a 25% slag-cement substitution a very significant increase in strength was shown. The increase was more pronounced at the age of 28 days when compared to 14 days and recorded to be 31.90%. As for the 50% and 75% slag-cement substitution, no significant increase in strength improvement was noticed. The test results showed a 2.66% enhancement for the 50% slag- cement substitution and a 2.45% increase for a 75% slag-cement replacement. The study also showed that slag-cement required a higher water-cement factor for the normal consistency.*

**Keywords:** Cement slag, mortar, age of mortar, substitution, compressive strength

### Abstrak

*Saat ini pemanfaatan limbah industri sebagai material bahan bangunan banyak dikembangkan, salah satunya yaitu pemanfaatan Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) yang sering disebut dengan Semen Slag yang merupakan residu pembakaran tanur proses pemurnian baja yang dihaluskan sebagai bahan perekat. Dalam kontrak pelaksanaan konstruksi, batasan waktu penyelesaian pekerjaan menjadi faktor penting untuk menghindari keterlambatan. Oleh sebab itu pengetahuan kekuatan/mutu material yang mempunyai peningkatan berdasarkan umur material sangat dibutuhkan. Penelitian ini menganalisis pengaruh umur mortar terhadap kuat tekan dengan substitusi Semen Slag pada campuran penyusunnya. Perbandingan material dalam mortar antara semen dan pasir adalah 1 : 3. Persentase penggantian semen slag terhadap semen Portland pada penelitian adalah 0%, 25%, 50% dan 75% dari berat semen, pengujian kuat tekan mortar dilakukan pada umur mortar 14 hari dan 28 hari. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada substitusi semen slag 25% terjadi peningkatan mutu yang sangat signifikan pada umur 28 hari jika dibandingkan pada umur 14 hari yaitu sebesar 31,90 %. Pada substitusi semen slag 50% dan 75% tidak terjadi peningkatan mutu yang signifikan yaitu 2,66 % untuk substitusi semen slag 50% dan 2,45% untuk substitusi semen slag 75%.*

**Kata kunci:** Semen slag, mortar, umur mortar, substitusi, kuat tekan

### Pendahuluan

Dalam rangka mengejar ketertinggalan Indonesia dengan negara lain, pemerintah Indonesia terus

berupaya menumbuhkan sentra-sentra ekonomi baru di seluruh daerah di tanah air. Langkah pemerintah Indonesia dalam mengejar ketertinggalan salah satunya adalah dengan

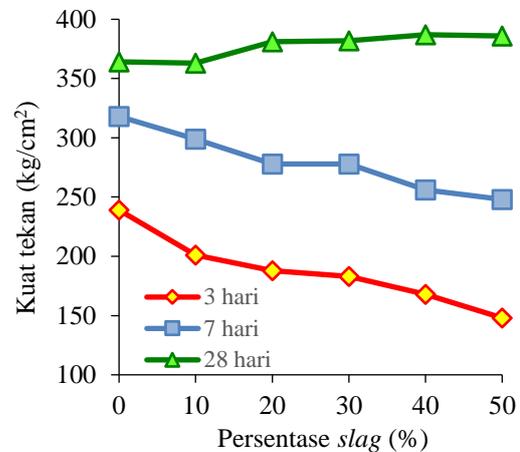
pembangunan infrastruktur. Namun dalam merealisasikan pembangunan infrastruktur, diperlukan dukungan dari industri konstruksi. Industri konstruksi di Indonesia saat ini sangat bergantung dengan komponen struktur berbasis semen karena banyaknya ketersediaan batu serpih dan batu kapur sebagai material pembuatan semen, ditambah biaya yang rendah, menjadikan semen sebagai opsi yang paling banyak digunakan pada konstruksi di Indonesia. Kelebihan lain dari bahan beton dan mortar adalah tidak diperlukannya perawatan seperti halnya baja dan kayu. Namun, pabrik semen adalah industri yang sebagian besar produksinya berupa pengecilan ukuran material (*size reduction*) dan pembakaran (*pyroprocessing*) sehingga merupakan salah satu penyumbang polutan yang cukup besar pada pencemaran udara berupa emisi gas dan partikel debu (Alfianto & Lestari, 2014).

Industri semen menjadi salah satu penghasil CO<sub>2</sub> terbesar. Hampir 5-7% emisi CO<sub>2</sub> global disebabkan oleh pabrik semen, sedangkan 900 kg CO<sub>2</sub> diemisikan ke atmosfer untuk menghasilkan satu ton semen (Benhelal *et al.*, 2013). Di tengah isu pengrusakan lingkungan dan pemanasan global, perkembangan dalam dunia konstruksi ikut berperan terhadap dampak perubahan lingkungan di dunia. Berbagai bahan konstruksi alternatif terus dikembangkan dengan material yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis dengan memanfaatkan limbah industri. Salah satunya adalah pemanfaatan slag. Slag atau *Granulated Blast Furnace Slag* (GBFS) adalah residu dari peleburan baja (Justin, H 2018) yang dapat diproses menjadi *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS).

GGBFS atau biasa disebut semen slag adalah *granulated blast furnace slag* yang sudah dihaluskan, dan digunakan sebagai bahan perekat pada beton dan mortar. Semen slag ini berbentuk butiran halus dan berwarna putih cerah dengan unsur pembentuk berupa kapur, silika, dan aluminium yang merupakan bahan mineral alami. GGBFS memiliki komposisi kimia mirip dengan kandungan semen Portland, sehingga dapat menggantikan fungsi semen Portland pada rentang yang luas dengan rasio perbandingan massa tertentu (Susilowati *et al.*, 2019).

Dalam penelitian ini diselidiki perilaku mekanis mortar dengan memanfaatkan semen slag sebagai substitusi semen Portland sebagai bahan pengikat. Menurut Karim *et al.* (2018) hasil penambahan slag jelas menurunkan kuat tekan pada awal pengikatan (*curing* 3 dan 7 hari). Tetapi pada akhir pengikatan 28 hari, penambahan slag dapat dikatakan tidak mempengaruhi kuat tekan bila dibandingkan dengan produk yang menggunakan semen Portland

saja. Hal ini dikarenakan slag memiliki sifat *pozzolanic* yaitu memiliki kuat-tekan awal rendah yang meningkat sebagai fungsi waktu (Karim *et al.*, 2018). Adapun pengujian kuat tekan mortar dengan campuran semen Portland jenis-I dengan slag disajikan pada Gambar 1. Komposisi kimia dan sifat fisika dari GGBFS dalam penelitian Karim *et al.* (2018) disajikan dalam Tabel 1.



Gambar 1. Pengaruh persentase slag terhadap kuat tekan (Karim *et al.*, 2018)

Tabel 1. Komposisi kimia dan sifat fisika slag (GGBFS)

No	Uraian	Hasil uji
1	Bagian tak larut (%)	0,47
2	Silikon Dioksida, SiO <sub>2</sub> (%)	36,00
3	Besi (III) Oksida, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,44
4	Aluminium Oksida, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	14,50
5	Kalsium Oksida, CaO (%)	44,90
6	Magnesium Oksida, MgO (%)	1,60
7	Belerang Trioksida, SO <sub>3</sub> (%)	0,73
8	Hilang pada pemijaran (%)	0,08
9	Alkali sebagai Na <sub>2</sub> O (%)	0,54
10	Mangan Trioksida, Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,24
11	Titanium Dioksida, Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	0,55
12	Berat jenis, (g/cm <sup>3</sup> )	2,87
13	Luas permukaan spesifik (cm <sup>2</sup> /g)	392,00

Sumber: Karim *et al.*, 2018

Pengenalan terhadap sifat mekanis bahan material sangat diperlukan. Dalam kontrak pelaksanaan konstruksi, batasan waktu penyelesaian pekerjaan menjadi faktor penting. Keterkaitan waktu dalam pelaksanaan proyek konstruksi beton perlu mendapat perhatian serius untuk menghindari keterlambatan proyek, sehingga diperlukan pengkajian khusus dalam proses pelaksanaan konstruksi (Ismael 2013). Pengetahuan tentang hubungan usia mortar (waktu pengerasan) dengan mutu mortar dapat dijadikan dasar untuk menentukan kegiatan selanjutnya, terutama bila terkait dengan pekerjaan yang berhubungan dengan

kekuatan elemen *mortar* atau beton yang dibuat sebelumnya. Hal ini akan sangat tampak pada gedung bertingkat, dimana pelaksanaan lantai berikutnya, sangat tergantung kekuatan elemen penumpu. Penelitian ini akan membandingkan aspek berat jenis semen dan semen *slag*, dan menganalisis pengaruh substitusi semen *slag* terhadap waktu ikat dan penggunaan air saat proses pembuatan adukan *mortar*, kuat tekan *mortar*, serta menganalisis pengaruh umur *mortar* terhadap mutu. Material yang digunakan adalah semen Portland menggunakan semen merk Gresik, pasir sebagai agregat halus berasal dari Muntilan, semen *slag* produksi PT. Krakatau Semen Indonesia, Cilegon.

Komposisi kimia dari semen *slag* (GGBFS) produksi PT. Krakatau Semen Indonesia, Cilegon. menurut penelitian Woelandari Fathonah *et al.* (2020) disajikan dalam Tabel 2.

**Tabel 2. Komposisi kimia semen *slag* (GGBFS) produksi PT. Krakatau Semen Indonesia, Cilegon.**

No.	Parameter	Oksida	Hasil uji
1	Kalsium Oksida	CaO	45,20%
2	Silikon Oksida	SiO <sub>2</sub>	34,80%
3	Aluminium Oksida	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,79%
4	Sulfur Oksida	SO <sub>3</sub>	1,74%
5	Ferri Oksida	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,34%
6	Magnesium Oksida	MgO	0,99%
7	Titanium Oksida	TiO <sub>2</sub>	0,55%
8	Kalium Oksida	K <sub>2</sub> O	0,38%
9	Mangan Oksida	MnO	0,25%
10	Natrium Oksida	Na <sub>2</sub> O	0,22%
11	Barium Oksida	BaO	0,08%
12	Phospor Oksida	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,05%
13	Stronsium Oksida	SrO	0,04%
14	Zirconium Oksida	ZrO <sub>2</sub>	0,04%
15	Chromium Oksida	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01%
16	Zinc Oksida	ZnO	30ppm

Sumber: Fathonah *et al.*, 2020

## Metode

Penelitian dilakukan dengan menggunakan metode eksperimental, data *collecting*, analisa dan observasi, yaitu dengan melakukan percobaan uji tekan pada *mortar* normal yang menggunakan komponen substitusi semen *slag* dengan variasi 0%, 25%, 50%, dan 75% dari berat semen yang diperlukan. Untuk waktu pengujian dilakukan setelah *mortar* berumur 14 dan 28 hari. Variabel-variabel dalam penelitian ini terbagi menjadi tiga jenis yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel kontrol.

Variabel bebas adalah variabel yang menjadi sebab perubahan timbulnya variabel terikat. Variabel

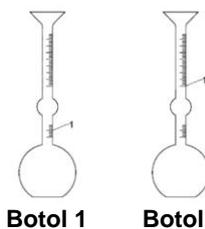
bebas pada penelitian ini adalah variasi substitusi semen *slag* dan umur *mortar*. Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi, dan menjadi akibat karena adanya variabel bebas. Variabel terikat dalam hal ini adalah hasil uji kuat tekan *mortar*. Variabel kontrol adalah variabel yang terkendali atau dibuat konstan. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah dimensi *mortar*, tipe semen yang digunakan, jenis agregat, cara pembuatan dan perawatan benda uji.

Untuk mengetahui karakteristik semen *slag* yang berasal dari PT. Krakatau Semen Indonesia dalam penelitian ini dilakukan dua pengujian. Pengujian yang dilakukan yaitu pengujian berat jenis dan pengujian konsistensi normal. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh gambaran tentang kebutuhan air agar proses kimia sempurna, serta waktu yang dibutuhkan untuk mencapai pengikatan sesuai standar.

## Pengujian berat jenis semen

Pengujian berat jenis diperlukan karena semen *slag* dalam pengujian ini berperan sebagai substitusi terhadap semen Portland. sehingga perlu diketahui apakah proses substitusi tersebut mempengaruhi berat *mortar*. Berat material menjadi faktor penting dalam pembangunan suatu konstruksi, mengingat berat sendiri konstruksi menjadi salah satu faktor dalam perencanaan konstruksi.

Dalam penelitian ini pengujian berat jenis semen *slag* dilakukan berdasarkan SNI 15-2531-1991. Berat jenis semen dapat diketahui dengan menggunakan metode *Le Chatelier*. Pada tiap semen dilakukan percobaan dengan dua botol *Le Chatelier* yang berbeda. Pada botol satu pembacaan skala awal pada angka satu dan botol dua pada skala 18. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2. Pengujian berat jenis semen dengan dua botol *Le Chatelier***

Untuk mengetahui berat jenis semen pada tiap botol dapat dilakukan menggunakan rumus :

$$\gamma_1 = \frac{m_1}{(V_2 - V_1)} \times d \quad (1)$$

dengan  $\gamma_1$  merupakan berat jenis semen pada pengujian botol satu,  $m_1$  adalah berat semen yang

dimasukkan dalam botol satu,  $V_1$  adalah pembacaan skala pertama sebelum dimasukkan semen,  $V_2$  adalah pembacaan skala kedua setelah dimasukkan semen, dan  $d$  adalah berat jenis air.

$$\gamma_2 = \frac{m_2}{(V_2 - V_1)} \times d \quad (2)$$

dengan  $\gamma_2$  merupakan berat jenis semen pada pengujian botol dua  $m_2$  adalah berat semen yang dimasukkan dalam botol dua,  $V_1$  adalah pembacaan skala pertama sebelum dimasukkan semen,  $V_2$  adalah pembacaan skala kedua setelah dimasukkan semen, dan  $d$  adalah berat jenis air.

Selanjutnya dapat dicari rata-rata dari percobaan antara botol pertama dan kedua, dengan cara :

$$\gamma = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \quad (3)$$

dengan  $\gamma$  merupakan berat jenis semen.

Pengujian berat jenis semen *slag* dapat dilihat dalam Gambar 3.



Gambar 3. Pengujian berat jenis semen botol pertama

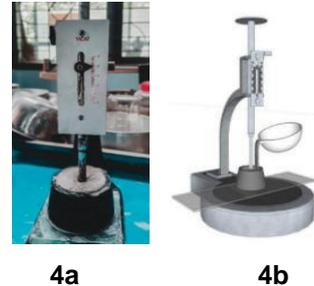
### Pengujian konsistensi normal semen

Konsistensi normal merupakan jumlah molekul air yang dibutuhkan oleh semen agar seluruh partikel semen dapat terhidrasi dengan sempurna. Fungsi air pada adukan *mortar* atau beton selain untuk proses hidrasi juga untuk menghasilkan kelecakan (*workability*) yang cukup untuk menjamin bahwa dalam proses pencampuran dan pemadatan terjadi massa yang homogen tanpa terjadinya segregasi. Jika terlalu banyak air, adukan akan encer sehingga terlepasnya agregat dari adukan menjadi kekhawatiran, juga air bebas dalam adukan akan mengakibatkan rongga (*void*) dalam *mortar*. Kekurangan air maka akan berakibat adukan kering sehingga sulit dicampur dan dipadatkan, juga dapat mengakibatkan tidak semua partikel semen terhidrasi sempurna.

Pada pengujian konsistensi normal dibuat pasta semen dengan memasukkan semen sebanyak 300 gram ke dalam mangkuk pengaduk, dan menuangkan air ke dalam mangkuk pengaduk 50%

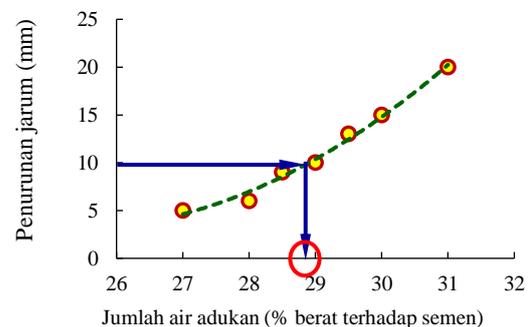
dari jumlah air yang digunakan selama percobaan. Pengadukan campuran selama 30 detik dengan kecepatan pengaduk  $140 \pm 5$  putaran per menit. Selama pengadukan awal sisa air diberikan secara perlahan, sehingga pasta tercampur merata (SNI 03-6826-2002).

Konsistensi normal dapat dicari dengan metode coba-coba menggunakan alat vicat seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengujian konsistensi normal (4a), alat vicat diameter 10 mm (4b)

Alat vicat dilengkapi dengan dua buah jarum, masing-masing berdiameter 10 mm untuk penentuan konsistensi normal, dan jarum 1 mm untuk penentuan waktu ikat awal. Konsistensi normal ditentukan berdasarkan penurunan jarum sebesar 10 mm dengan jarum vicat diameter 10 mm. Semen diuji dengan beberapa variasi kadar air, dan hasilnya digambarkan dalam grafik dimana persentase air merupakan absis (sumbu X) dan penurunan jarum merupakan ordinat (sumbu Y), dapat dilihat pada Gambar 5.

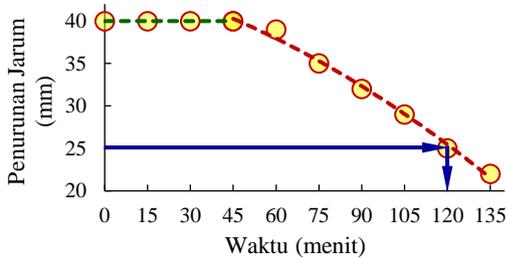


Gambar 5. Metode penentuan konsistensi normal

Data yang diperoleh kemudian dirumuskan sebagai fungsi kuadrat, dan jumlah air yang dibutuhkan pada penurunan jarum 10 mm dibaca dari kurva tersebut. Pendekatan fungsi kuadrat didekati dengan analisa statistik, sehingga fungsi kadar air terhadap penurunan jarum dapat diperoleh secara numeris. Nilai kadar air yang didapatkan pada penurunan jarum 10 mm merupakan konsistensi normal semen tersebut.

### Pengujian waktu ikat semen

Pengujian ini bertujuan untuk menentukan waktu yang diperlukan semen untuk mengeras, terhitung dari mulai bereaksi dengan air dan menjadi pasta semen hingga pasta semen cukup kaku untuk menahan tekanan. Prosedur pengujian waktu ikat semen yang pertama adalah persiapan alat jarum vicat dan pasta semen. Dilanjutkan dengan mencatat awal penunjukan jarum selanjutnya. Pencatatan penurunan jarum dilakukan setelah 30 detik dan dilanjutkan dengan mengamati penunjukan jarum setiap 15 menit sampai didapat penetrasi yang lebih kecil dari 25 mm. Jarak titik pengukuran satu dan lain tidak boleh lebih besar dari 6 mm dan tidak boleh lebih kecil dari 9 mm diukur dari tepi cetakan (*mold*). Pencatatan waktu dilanjutkan hingga diperoleh waktu yang diperlukan hingga jarum vicat tidak dapat menembus pasta semen. Dari kurva hubungan penurunan jarum dan waktu, ditentukan waktu yang diperlukan untuk mencapai penetrasi 25 mm yang disebut waktu ikat awal (Anggraini *et al.*, 2013). Metode penentuan kurva hubungan ini juga dilakukan secara numeris (Gambar 6).



Gambar 6. Penentuan waktu ikat awal

### Pembuatan benda uji

Benda uji pada penelitian ini merupakan *mortar* dengan dimensi 50x50x50 mm sesuai dengan ketentuan yang ada dalam SNI 03-6825-2002. Benda uji *mortar* ini memiliki komposisi campuran semen dan agregat halus sebesar 1 ba (*binding agent*) : 3 ps, dengan FAS sebesar 0,5. Sedangkan untuk variasi substitusi semen *slag* terhadap Semen Portland adalah 0%, 25%, 50%, dan 75% dari berat semen. Jumlah spesimen tiap variasi tersaji dalam Tabel 3.

Tabel 3. rencana jumlah benda uji

Mortar	Substitusi semen slag				Jumlah benda uji
	0%	25%	50%	75%	
Kuat tekan 14 hari	6	6	6	6	24
Kuat tekan (28 hari)	6	6	6	6	24
<b>Total Benda Uji</b>					<b>48</b>

### Pengujian kuat tekan mortar

Berdasarkan SNI 03-6825-2002, kekuatan tekan *mortar* semen adalah gaya maksimum per satuan luas yang bekerja pada benda uji *mortar* semen berbentuk kubus dengan ukuran tertentu serta berumur tertentu. Alat yang digunakan dalam pengujian kuat tekan *mortar* adalah *Compression Testing Machine*. Kuat tekan *mortar* dapat dihitung dengan rumus:

$$f'c = \frac{F}{A} \quad (3)$$

dengan  $f'c$  adalah kuat tekan *mortar*,  $F$  adalah gaya maksimum, dan  $A$  adalah luas bidang permukaan.

### Hasil dan Pembahasan

#### Pengujian berat jenis semen slag

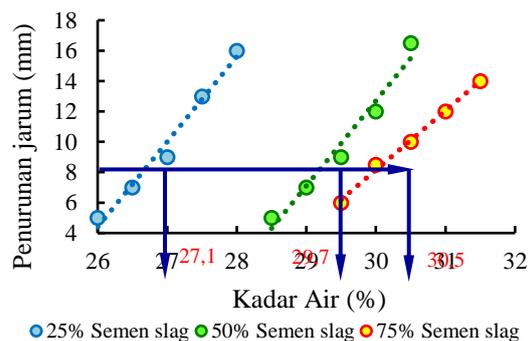
Hasil pengujian berat jenis semen *slag* pada suhu air 20°C dan suhu ruangan 28°C dapat dilihat pada Tabel 4. Menurut SNI 15-2049-2004, kisaran berat jenis semen Portland adalah 3,15 gr/ml. Hasil uji berat jenis semen *slag* menunjukkan nilai 3,05 gr/ml, sehingga semen *slag* ini memiliki berat jenis lebih rendah daripada semen Portland, menyebabkan berat jenis *mortar* dengan campuran semen *slag* lebih ringan dibandingkan dengan *mortar* yang menggunakan semen Portland.

Tabel 4. analisis berat jenis semen slag

Keterangan	Percobaan I	Percobaan II
Berat semen (gr)	64	15
V <sub>1</sub> (ml)	1	18
V <sub>2</sub> (ml)	23	22,8
Berat jenis (gr/ml)	2,909	3,191
Berat jenis rata-rata (gr/ml)	3,05	

#### Pengujian Konsistensi Normal Semen Slag

Hasil konsistensi normal semen *slag* dengan kadar substitusi 25%, 50%, dan 75% tampak dalam Gambar 7.

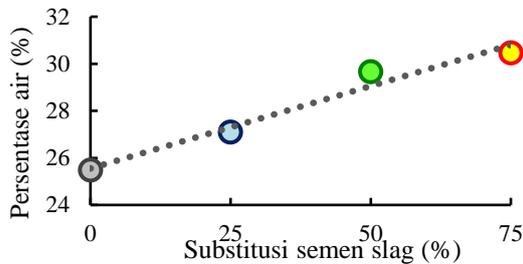


Gambar 7. Grafik penentuan konsistensi normal substitusi semen slag 25 %, 50%, dan 75%

Hubungan kandungan semen *slag* dan konsistensi normal dapat dilihat pada Tabel 5 dan Gambar 8.

**Tabel 5. Hasil konsistensi normal semen substitusi**

No	Substitusi semen <i>slag</i>	Persentase air (%)
1	0%	25.489
2	25%	27.094
3	50%	29.661
4	75%	30.468

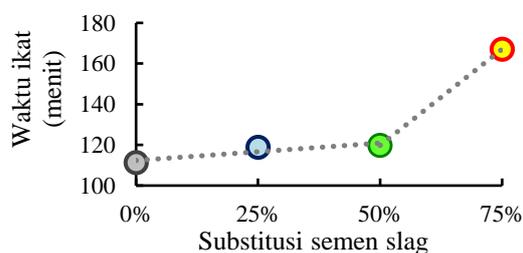


**Gambar 8. Grafik konsistensi normal semen**

Data tersebut menunjukkan bahwa variasi substitusi semen *slag* membutuhkan lebih banyak air dibandingkan semen normal. Hal ini menunjukkan semen *slag* cenderung meningkatkan kebutuhan air selama proses pengadukan. Peningkatan ini dikarenakan penyerapan semen *slag* yang lebih tinggi dibandingkan semen Portland, sehingga mengakibatkan jumlah air yang diserap meningkat. Penelitian ini juga menunjukkan bahwa *mortar* dengan substitusi 100% *slag* memiliki waktu pengerasan sangat lama. Dapat disimpulkan bahwa reaksi *slag* semen murni dengan air tidak mengakibatkan terjadinya proses hidrasi. Dengan kata lain dalam penggunaannya, semen *slag* membutuhkan komponen semen Portland sebagai pemicu (*trigger*) untuk dapat bereaksi dengan air.

#### Waktu ikat semen

Waktu ikat semen ditentukan berdasarkan penurunan 25 mm dengan jarum vicat diameter 10 mm dengan kadar air yang ditetapkan berdasarkan hasil pengujian Konsistensi Normal. Hasil pemeriksaan waktu ikat untuk masing-masing variasi substitusi semen *slag* dapat dilihat pada Tabel 6 dan Gambar 9.



**Gambar 9. Grafik waktu ikat semen substitusi**

**Tabel 6. Hasil waktu ikat semen substitusi**

No	Substitusi semen <i>slag</i>	Waktu ikat (menit)
1	0%	111.243
2	25%	118.894
3	50%	119.791
4	75%	167.072

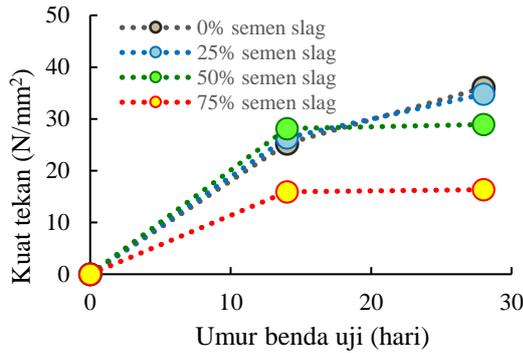
#### Pengaruh variasi semen *slag* sebagai komponen substitusi Portland terhadap kuat tekan *mortar*

Pada penelitian ini, substitusi semen *slag* lebih dari 50% memiliki efek perlambatan yang berlebihan. Hal ini didukung penelitian sebelumnya dari Brooks (2000) dan Nehdi & Sumner (2002) yang telah mempelajari waktu ikat beton termasuk GGBFS, secara umum menjelaskan peningkatan persentase substitusi GGBFS pada semen akan memperpanjang waktu pengerasan beton. Pola waktu ikat sebagai fungsi kandungan semen *slag* dapat dilukiskan sebagai fungsi bi-linier, dimana prosentase kandungan 50% merupakan titik kritis yang merubah perilaku waktu ikat semen *slag*, dan selanjutnya bahan *mortar*. Dari pengujian kuat tekan *mortar* disajikan dalam Tabel 7 dan Gambar 10. Dari tabel dan grafik dapat dilihat bahwa pada umur 14 hari dan 28 hari *mortar* dengan substitusi semen *slag* 0% dan substitusi semen *slag* 25% mengalami peningkatan kuat tekan yang sangat significant pada umur 28 hari, jika dibandingkan pada umur 14 hari. Pada substitusi semen *slag* 0% terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 42,78%, sedangkan pada substitusi semen *slag* 25% terjadi peningkatan kuat tekan sebesar 31,90%.

**Tabel 7. Hasil pengujian kuat tekan *mortar***

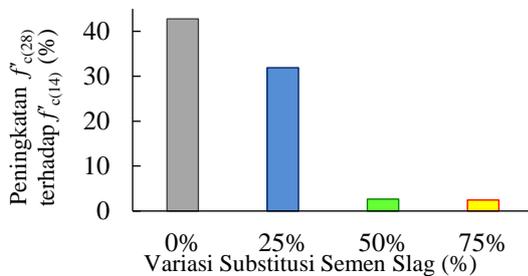
No	Substitusi semen <i>slag</i>	Kuat tekan (N/mm <sup>2</sup> )		Peningkatan mutu pada umur 28 hari terhadap umur 14 hari (%)
		$f'_c$ (14)	$f'_c$ (28)	
1	0 %	25,23	36,02	42,77
2	25 %	26,36	34,77	31,90
3	50 %	28,16	28,91	2,66
4	75 %	15,93	16,32	2,45

Pada substitusi semen *slag* 50% dan 75% tidak terjadi peningkatan kuat tekan yang significant baik pada umur 14 hari dan 28 hari. Pada substitusi semen *slag* 50% peningkatan kuat tekan *mortar* pada umur 28 hari jika dibandingkan pada umur 14 hari yaitu sebesar 2,66% dan pada substitusi semen *slag* 75% peningkatan kuat tekan *mortar* pada umur 28 hari jika dibandingkan pada umur 14 hari yaitu sebesar 2,45%. Untuk menjelaskan peningkatan kuat tekan *mortar* pada substitusi 50% dan 75% yang rendah dari umur 14 hari ke umur 28 hari maka dilakukan perbandingan antara kuat tekan umur 14 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari. Didapatkan hasil yang dapat dilihat pada Gambar 11.

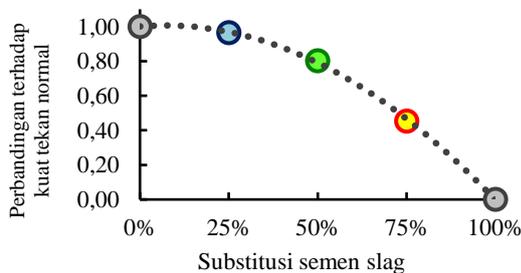


Gambar 10. Hubungan kuat tekan dengan umur mortar

Dari Gambar 11 dapat diketahui bahwa semen *slag* memiliki fungsi mempercepat pengerasan terhadap mortar. Hal ini dibuktikan dimana mortar dengan substitusi semen *slag* 25%, 50%, dan 75% terjadi peningkatan kuat tekan mortar yang signifikan pada umur 14 hari yaitu sebesar 76%, 97%, dan 98% terhadap kuat tekan umur 28 hari. Jika dibandingkan dengan mortar tersubstitusi dengan mortar normal (0% semen *slag*), didapat hubungan seperti yang dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 11. Grafik pencapaian kuat tekan mortar umur 14 hari terhadap kuat tekan umur 28 hari



Gambar 12. Grafik perbandingan kuat tekan mortar dengan variasi substitusi semen slag terhadap kuat tekan mortar normal

Gambar 12 menunjukkan dengan adanya peningkatan substitusi semen *slag* terhadap semen Portland berpengaruh pada penurunan kuat tekan mortar, dimana penurunan kuat tekan yang terjadi tidak linier, melainkan sangat signifikan seiring dengan peningkatan substitusi semen.

## Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan mengenai "Pengaruh Umur Terhadap Mutu Mortar Dengan Substitusi Semen *Slag* Sebagai Pengikat" dapat diperoleh beberapa kesimpulan. Berat jenis semen *slag* lebih ringan daripada semen Portland, yaitu 3,05 gr/ml sedangkan berat jenis semen Portland yaitu 3,15 gr/ml. Hal ini berdampak positif pada struktur-struktur yang menggunakan semen *slag*, karena penurunan berat sendiri konstruksi, tidak hanya berdampak pada elemen struktur itu sendiri tetapi juga pada elemen kolom pemikul dan pondasi.

Peningkatan substitusi semen *slag* terhadap semen Portland berpengaruh pada peningkatan kebutuhan air adukan (peningkatan konsistensi normal) dan waktu ikat. Peningkatan faktor air semen akan berpengaruh pada kelecakan awal adukan, adukan akan lebih encer dan berpotensi mengakibatkan segregasi agregat kasar. Penggunaan *additive* berupa *water-reducer* dalam kasus semen-*slag* tak dapat digunakan, karena akan mempengaruhi kinerja semen ini selama proses pengerasan. Alternatif yang dapat digunakan adalah pemanfaatan *superplasticizer*. *Additive* ini mengurangi geseran antara partikel dan semen dengan menciptakan muatan listrik yang berlawanan, sehingga kelecakan dapat dipertahankan dengan air yang relatif lebih sedikit. Kebutuhan air untuk proses hidrasi semen *slag* harus ditentukan dengan teliti, dan koreksi terhadap kandungan air agregat harus diperhitungkan.

Pada substitusi semen *slag* 25% terjadi peningkatan kuat tekan yang sangat signifikan pada umur 28 hari jika dibandingkan pada umur 14 hari yaitu sebesar 31,90%. Hal ini menunjukkan bahwa proses hidrasi semen Portland belum sempurna. Sebaliknya, pada substitusi semen *slag* 50% dan 75% tidak terjadi peningkatan kuat tekan yang signifikan. Ini menunjukkan bahwa semen *slag* telah mencapai kekuatan penuh pada usia dini. Pada substitusi 25%, perilaku pengikatan dan perkembangan kuat tekan masih didominasi oleh semen Portland, yang diketahui akan mencapai kekuatan penuh pada usia 28 hari. Pada saat kandungan semen ditingkatkan, pengaruh ini menurun, sehingga perilaku proses kimia semen *slag* menjadi lebih utama. Hal ini tampak dari data bahwa pada substitusi semen *slag* 50%, peningkatan kuat tekan mortar pada umur 28 hari jika dibandingkan pada umur 14 hari yaitu sebesar 2,66% dan pada substitusi semen *slag* 75% peningkatan kuat tekan mortar pada umur 28 hari jika dibandingkan pada umur 14 hari yaitu sebesar 2,45%. Temuan ini mendukung pengamatan terhadap percepatan pengerasan pada mortar berbasis semen *slag*. Dibuktikan pada mortar umur

14 hari, dimana *mortar* dengan substitusi semen *slag* sebesar 25%, 50%, dan 75% terjadi peningkatan pencapaian kuat tekan *mortar* yang signifikan yaitu sebesar 76%, 97%, dan 98% terhadap kuat tekan optimum.

Penelitian menunjukkan adanya perbedaan antara penelitian ini dengan penelitian Karim, *et al.* tentang substitusi semen *slag* optimum dalam peningkatan mutu *mortar*. Pada penelitian Karim, *et al.* substitusi optimum untuk meningkatkan mutu *mortar* pada umur 28 hari adalah 50%, sedang pada penelitian ini adalah 25%. Hal ini terjadi karena kandungan mineral semen *slag* yang digunakan dalam penelitian dan *slag* yang digunakan oleh Karim *et al.* (2018) berbeda. Terdapat unsur-unsur yang mempengaruhi ikatan kimia pada antarmuka antara agregat dan *mortar*. Sebagai simpulan dapat dikatakan bahwa pemanfaatan di semen *slag* lapangan dapat direkomendasikan untuk digunakan, karena memiliki berat jenis yang lebih ringan, sehingga dapat berpengaruh pada beban struktur, penggunaan semen *slag* sebagai substitusi bahan pengikat dapat mempercepat proses pengerasan sehingga pelepasan bekisting bisa lebih awal, penggunaan semen *slag* disarankan pada substitusi tidak lebih dari 50%.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Ir. Hariadi Dewabrata, MT. yang telah membantu penyediaan semen *slag*, Laboratorium Bahan dan Konstruksi Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro yang telah memfasilitasi peralatan dalam pembuatan sampel dan pengujian.

## Daftar Pustaka

Alfianto, P. N., & Lestari, P. (2014). Analisis emisi debu dan partikulat terhadap penggunaan bahan bakar alternatif di industri semen. *Jurnal Teknik Lingkungan* 20(1), 11–19.

Anggraini, R., Ristinah, & Nurlina, S. (2013). Pengaruh variasi penambahan bottom ash dalam pasta semen. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 7(1), 66–73.

Badan Standardisasi Nasional. (1991). *Metode pengujian berat jenis semen portland*, SNI 15-2531-1991. Jakarta: SNI.

Badan Standardisasi Nasional. (2002a). *Metode pengujian konsistensi normal semen portland*

*dengan alat vicat untuk pekerjaan sipil*, SNI 03-6826-2002. Jakarta: SNI.

Badan Standardisasi Nasional. (2002b). *Standar nasional indonesia metode pengujian kekuatan tekan mortar semen portland untuk pekerjaan sipil*, SNI 03-6825-2002. Jakarta: SNI.

Badan Standardisasi Nasional. (2004). *Semen portland*, SNI 15-2049-2004. Jakarta: SNI.

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO<sub>2</sub> emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142–61.

Brooks, J. J., Johari, M. A. M., & Mazloom, M. (2000). Cement & concrete composites effect of admixtures on the setting times of high-strength. *Test*, 22(4), 293–301.

Fathonah, W., E. Mina, R. I. Kusuma, and D. Y. Ihsan. (2020). Stabilisasi tanah menggunakan semen *slag* serta pengaruhnya terhadap nilai california bearing ratio (CBR) (Studi Kasus: Jl. Munjul, Kp. Ciherang, Desa Pasir Tenjo, Kecamatan Sindang Resmi). *Jurnal Fondasi* 9(1), 87–93.

Justin, H. (2018) Studi eksperimental beton geopolimer *slag* dengan variasi kadar silika fume, *Skripsi*, Universitas Katolik Parahyangan Bandung,

Ismael. (2013). Keterlambatan proyek konstruksi gedung faktor penyebab dan tindakan pencegahannya. *Februari Jurnal Momentum*, 14(1), 46–56.

Karim, G. A., Susilowati, E., & Pratiwi, W. (2018). Pengaruh ground granulated blast furnace *slag* terhadap sifat fisika semen portland jenis-I the effect of ground granulated blast furnace *slag* on physical properties of portland cement type I. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 8, 47–52.

Nehdi, M. L., & Sumner, J. (2002). Optimization of ternary cementitious *mortar* blends using factorial experimental plans. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 35(8), 495–503.

Susilowati, A., Pratikto, Praditya, D. Y., & Wijayanto, K. (2019). Kuat tekan self compacting concrete menggunakan ground granulated blast furnace *Slag*. Prokons. *Jurnal Teknik Sipil* 13(2), 111–17.