

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

Gaos Abdul Karim*, Eny Susilowati, Wieke Pratiwi

Balai Besar Bahan dan Barang Teknik – Kementerian Perindustrian RI
Jl. Sangkuriang no. 14, Bandung
*Email: gaossian@gamil.com

Diterima: 17 Juli 2018

Direvisi: 8 Agustus 2018

Disetujui: 30 Agustus 2018

ABSTRAK

Penelitian mengenai Pengaruh *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) terhadap Sifat Fisika Semen Portland Jenis-I telah dilakukan. GGBFS kelas aktifitas 100 digunakan sebagai bahan tambahan pada Semen Portland Jenis-I dengan variasi GGBFS pada campuran yaitu 0% (kontrol), 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%. Terhadap setiap campuran dilakukan uji kuat tekan, waktu setting, pemuaiian dengan autoclave dan pemuaiian karena sulfat. Dibandingkan dengan karakter kontrol, kuat tekan mortar pada umur 3 dan 7 hari lebih rendah pada semua variasi, tetapi pada kuat tekan 28 hari, kuat tekan campuran umumnya lebih tinggi dari kontrol dan optimum pada perbandingan 50:50. Penambahan GGBFS menyebabkan penambahan waktu setting, penurunan sifat pemuaiian pada uji pemuaiian dengan autoclave, dan penurunan pemuaiian karena sulfat.

Kata kunci: GGBFS, kuat tekan, pemuaiian dengan autoclave, pemuaiian karena sulfat.

ABSTRACT

Research on The Effect of *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) on Physical Properties of Portland Cement Type I has been conducted. GGBFS with activity class of 100 was added to Portland cement at 0% (as control), 10%, 20%, 30%, 40% and 50% variation. The characteristic of compressive strength, setting time, autoclave expansion and sulphate expansion was tested. Compared to the control, the compressive strength of mixtures at curing time of 3 and 7 days, was lower compared to the control. But at curing time of 28 days, the compressive strength reached more than control and optimum at 50% variation of GGBFS was achieved. The addition of GGBFS at whole mixture indicated of increasing setting time, lower autoclave expansion, and lower sulphate expansion.

Keyword: GGBFS, compressive strength, autoclave expansion test, sulphate expansion test

PENDAHULUAN

Blast furnace slag (ASTM C.989-04 *Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortar*) adalah produk non logam. GGBFS pada dasarnya terdiri dari silikat dan alumino silikat, kapur dan bahan dasar lainnya yang dikembangkan dalam kondisi cair bersama-sama dengan besi dalam *blast furnace*. Berdasarkan PP No 101/2014, *Slag* yang berasal dari peleburan besi dan lain-lain dikategorikan sebagai limbah B3 kelas 2 dan harus dikelola dengan sebaik-baiknya agar tidak mencemari lingkungan. Timbunan *slag* sebagai produk samping akan

meningkat seiring dengan pertumbuhan industri peleburan logam terkait dengan Undang-undang Minerba, No 4 Tahun 2009 yang mengharuskan pengolahan mineral. Kajian pemanfaatan GGBFS pada industri semen telah dilakukan [1].

Pemanfaatan *slag* ke dalam produk semen sudah dilakukan sejak lama, misalnya: di Jerman (1826), USA (1996), China (1990), dan di Indonesia (2017). GGBFS (*Ground Granulated Blast-Furnace Slag*) atau *slag* mempunyai bahan penyusun serupa dengan semen namun komposisi berbeda, sehingga *slag* juga akan bereaksi ketika ditambah air. Proses hidrasi awal *slag* sangat lambat dibandingkan terhadap hidrasi semen pada suhu pemeliharaan standar (20°C).

Penelitian mengenai pemanfaatan *slag* hingga saat ini banyak dilakukan. Mikrostruktur campuran semen Portland dan *slag* yang diaktivasi dengan alkali sangat dipengaruhi oleh suhu. Ketika suhu hidrasi dinaikkan, terdapat retakan mikro (*micro crack*) dan penurunan kuat tekan pasta [2]. Campuran GGBFS dan mikro-silika pada perbandingan tertentu memberi kuat-tekan beton rendah pada saat awal, tetapi memberi kuat-tekan tinggi pada umur 56 hari [3]. Sedangkan permeabilitasnya berkurang, baik pada umur pengikatan awal maupun pengikatan lebih lanjut.

Penambahan GGBFS pada *fiber reinforced concrete* memberikan kuat lentur yang lebih baik dibandingkan spesimen kontrol dengan OPC (Ordinary Portland Cement) saja [4]. Penambahan GGBFS hingga 70% meningkatkan daya tahan penetrasi klorida lebih baik dibandingkan terhadap kontrol OPC [5].

Karakteristik dan komposisi *slag* dari setiap proses peleburan berbeda satu dengan lainnya, sehingga dalam pemanfaatannya memerlukan penelitian lanjut yang spesifik. Terlebih lagi, semen Portland-*slag* baru diproduksi di Indonesia pada semester kedua 2018 dengan standar spesifikasi mengacu pada SNI 8363:2017.

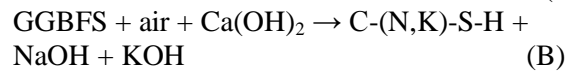
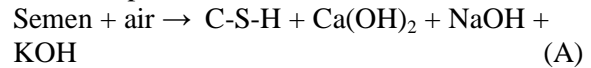
Proses hidrasi semen adalah reaksi eksoterm. Panas reaksi ini dapat menyediakan energi untuk aktivasi alkali hidroksil (Ca(OH)_2) yang selanjutnya bereaksi dengan partikel GGBFS. Dengan demikian diperlukan ion alkali sebagai aktivator untuk meningkatkan reaksi GGBFS tersebut [6]. Penjelasan hidrasi *slag* yang diaktivasi dengan alkali diteliti lebih mendalam dengan menggunakan campuran model [7].

Slag utamanya terdiri dari SiO_2 , CaO , Al_2O_3 and MgO , mirip dengan senyawa utama semen [6]. Hasil utama reaksi hidrasi *slag* akan mirip dengan hasil hidrasi semen kalsium silikat hidroksit (C-S-H)₁₂. Tetapi, hasil hidrasi *slag* lebih bersifat gel dibandingkan terhadap hasil hidrasi semen, sehingga meningkatkan kepadatan pasta. Makin banyak GGBFS yang bereaksi, pori hasil hidrasi GGBFS makin berkurang dan dengan ukuran yang lebih kecil.

Proses hidrasi GGBFS di dalam campurannya dengan semen adalah hidrasi sekunder atau hidrasi lanjut dari semen yang menghasilkan Ca(OH)_2 dalam pasta atau beton.

Reaksi *pozzolanic* dari GGBFS menggunakan Ca(OH)_2 dari hidrasi semen untuk menghasilkan senyawa C-S-H tambahan. Mekanisme hidrasi GGBFS dapat dinyatakan sebagai berikut [7].

a. Reaksi primer:



b. Reaksi sekunder:

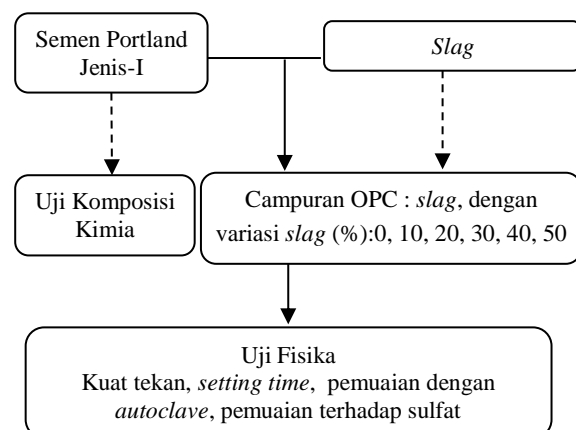
- (a) hasil reaksi utama semen + GGBFS
- (b) hasil reaksi utama semen + hasil reaksi utama GGBFS

BAHAN DAN METODE

Slag (GGBFS) untuk penelitian ini diperoleh dari salah satu industri semen di Indonesia. Semen Portland Jenis-I digunakan sebagai bahan dasar semen. Pasir yang digunakan adalah *graded standard sand* sesuai ASTM C778-13.

Penelitian dilakukan di Laboratorium Semen B4T (Balai Besar Bahan dan Barang Teknik) Bandung, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dan pengujiannya dilakukan menurut standar berikut ini:

1. Penentuan *slag activity index* dengan sesuai ASTM C989:2004.
2. Penentuan pemuai dengan sulfat sesuai ASTM C1012-04.
3. Pengujian komposisi kimia, kuat tekan, *setting time*, dan pemuai dengan *autoclave* dilakukan sesuai SNI 2049:2015.



Gambar 1. Diagram Alir Percobaan Penambahan *Slag* pada Semen Portland Jenis-I

Tahapan Penelitian

Penelitian ini secara garis besar dibagi menjadi tiga kegiatan berikut ini.

1. Pengujian komposisi kimia terhadap semen Portland Jenis-I, *slag* dan berat jenis
2. Pencampuran *slag* dengan semen dengan variasi presentasi *slag* 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%.
3. Pengujian untuk setiap variasi campuran dengan parameter: kuat tekan, *setting time*, pemuaihan dengan *autoclave* dan pemuaihan karena sulfat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Uji Semen Portland Jenis-I (Ordinary Portland Cement) dan GGBFS

Pengujian komposisi kimia dan sifat fisika semen Portland Jenis-I dan *slag* berdasarkan SNI 2049:2015 disajikan pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi Kimia dan Sifat Fisika Semen Portland Jenis-I

Uraian	Hasil Uji
1. Bagian tak larut (%)	0,63
2. Silikon dioksida, SiO ₂ (%)	19,03
3. Besi (III) Oksida, Fe ₂ O ₃ (%)	2,98
4. Aluminium Oksida, Al ₂ O ₃ (%)	5,29
5. Kalsium Oksida, CaO (%)	63,25
6. Magnesium Oksida, MgO (%)	3,34
7. Belerang Trioksida, SO ₃ (%)	2,06
8. Hilang pada pemijaran (%)	3,32
9. Alkali sebagai Na ₂ O (%)	0,55
10. Mangan Trioksida, Mn ₂ O ₃ (%)	0,05
11. Titanium Dioksida, TiO ₂ (%)	0,24
12. Fosfor pentaoksida, P ₂ O ₅ (%)	0,07
13. Kromiun Trioksida, Cr ₂ O ₃ (%)	0,02
14. Klorida, Cl (%)	0,001
Senyawa Hipotetik :	
C3S	67,19
C2S	3,87
C3A	8,97
C4AF	9,08
Berat jenis, (g/cm ³)	3,06
Luas permukaan spesifik (cm ² /g)	362

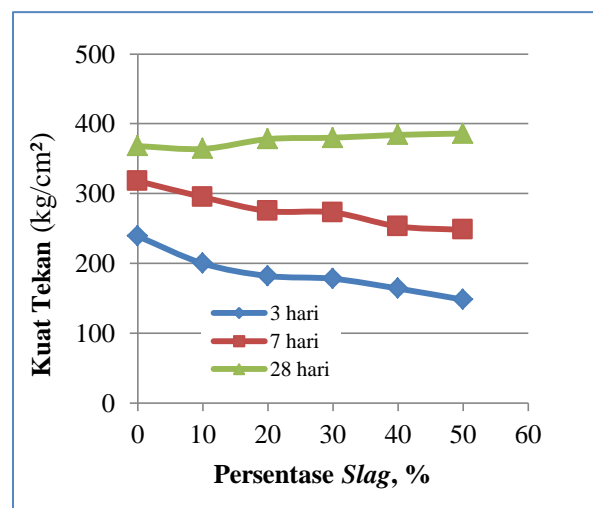
Komposisi semen Portland Jenis-I ini memenuhi spesifikasi menurut SNI 2049:2015

Tabel 2. Komposisi Kimia dan Sifat Fisika *Slag*

Uraian	Hasil Uji
1. Bagian tak larut (%)	0,47
2. Silikon dioksida, SiO ₂ (%)	36,00
3. Besi (III) Oksida, Fe ₂ O ₃ (%)	0,44
4. Aluminium Oksida, Al ₂ O ₃ (%)	14,50
5. Kalsium Oksida, CaO (%)	44,90
6. Magnesium Oksida, MgO (%)	1,60
7. Belerang Trioksida, SO ₃ (%)	0,73
8. Hilang pada pemijaran (%)	0,08
9. Alkali sebagai Na ₂ O (%)	0,54
10. Mangan Trioksida, Mn ₂ O ₃ (%)	0,24
11. Titanium Dioksida, Ti ₂ O ₃ (%)	0,55
Berat Jenis, (g/cm ³)	2,87
Luas permukaan spesifik (cm ² /g)	392

Pengaruh Penambahan *Slag* pada Kuat Tekan Mortar

Hasil pengujian kuat tekan mortar campuran semen Portland Jenis-I dengan *slag* disajikan pada Gambar 2. 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. Hal ini dikarenakan *slag* memiliki sifat *pozzolanic* yaitu memiliki kuat-tekan awal rendah dan meningkat dengan waktu.



Gambar 2. Pengaruh Persentase *Slag* terhadap Kuat Tekan

Pada umur pengikatan 3 hari, kuat tekan turun dengan penambahan *slag* yaitu dari 239 kg/cm² sampai sekitar 148 kg/cm². Pada umur pengikatan 7 hari nilai kuat tekan berkurang yaitu dari 318 kg/cm² (0% *slag*) menjadi 248 kg/cm² (50%:50%). Akhirnya, kuat tekan pada umur 28 hari dapat dikatakan tidak dipengaruhi adanya *slag*, atau sedikit kenaikan dari 364 kg/cm² menjadi 386 kg/cm²

Data kuat tekan campuran *slag* semen Portland Jenis-I 50:50, yaitu 386 kg/cm² digunakan untuk menghitung indeks aktivitas (*activity index*) dari *slag*, ditemukan nilainya adalah 105%. Dengan nilai ini, *slag* yang digunakan dalam penelitian ini masuk ke dalam kelas 100 dalam rentang indeks aktivitas *slag* 90% (buruk) - 120% (baik) menurut ASTM C989:2004.

Berdasarkan SNI 2049-2015, persyaratan minimum nilai kuat tekan semen Portland Jenis-I 135 kg/cm² (umur 3 hari); 215 kg/cm² (7 hari) dan umur 300 kg/cm² (28 hari). Dengan demikian semen Portland Jenis-I yang digunakan dalam penelitian ini (lihat Gambar 2) memenuhi persyaratan SNI 2049-2015. Penambahan *slag* pada Portland Jenis-I menjadikan campuran masuk kategori yang sesuai dengan SNI nomor 8363:2017, yaitu kuat tekan minimal berturut-turut 130, 200 dan 250 kg/cm² untuk umur 3, 7 dan 28 hari.

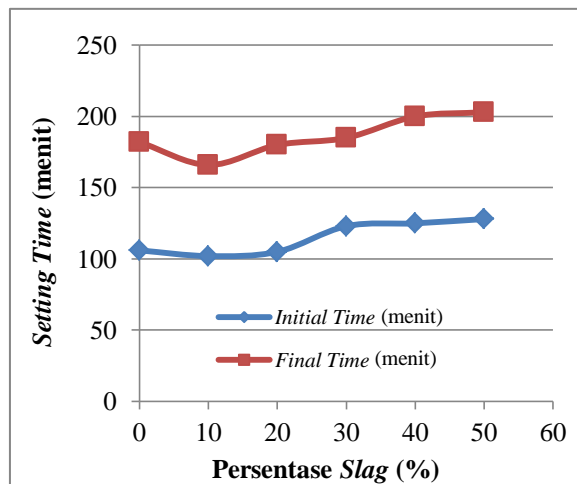
Reaksi semen dengan air (C₃S + H₂O) menghasilkan senyawa kalsium silika hidrat (CSH, yang bersifat sebagai bahan perekat) dan Ca(OH)₂. Dengan kandungan SiO₂ yang cukup tinggi dalam *slag* (35,27% dibanding 20,19% dalam semen Portland tipe I), maka SiO₂ dan Ca(OH)₂ akan bereaksi membentuk senyawa CSH tambahan yang mengakibatkan benda uji mortar memiliki kuat tekan makin tinggi. Dari penjelasan di atas, dapat disimpulkan bahwa penambahan *slag* dapat memperbaiki kuat tekan benda uji mortar meskipun memerlukan waktu lebih lama.

Pengaruh Penambahan *Slag* pada *Setting Time*

Hasil pengujian *setting time* disajikan pada Gambar 3. *Setting time* semen Portland Jenis-I tanpa *slag* pada pengujian ini: *initial time* 106 menit dan *final time* 182 menit. Nilai ini dalam rentang ketentuan SNI 2049-2015, yaitu berturut-turut minimum 45 menit dan maksimum 375 menit.

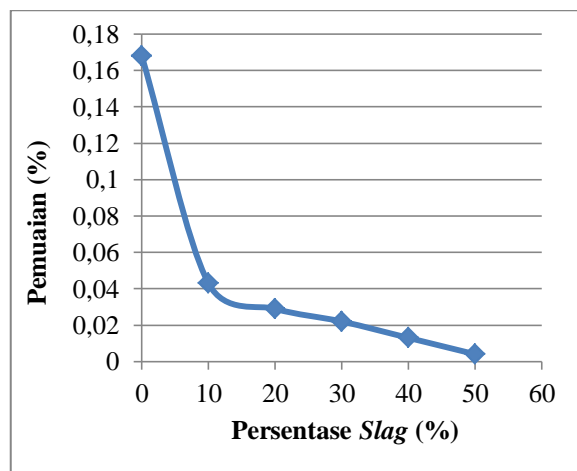
Waktu pengikatan jelas meningkat seiring dengan penambahan *slag* (Gambar 3). Hal ini disebabkan karena reaksi hidrasi *slag* yang relatif lebih lambat. Selain itu, kemungkinan ada faktor lain yang dapat mempengaruhi waktu pengikatan pada campuran *slag*-semen, seperti jumlah air yang digunakan, suhu ruangan, angin, dan kondisi lingkungan sekitar lainnya.

Proses pemuaiannya pada *slag*-semen ini terjadi karena benda uji tidak tahan terhadap pengaruh suhu dan tekanan tinggi dari *autoclave* sehingga benda uji mengembang. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa penambahan 10% *slag* mengakibatkan penurunan pemuaiannya secara drastis (Gambar 4). Penambahan *slag* selanjutnya masih mengakibatkan penurunan pemuaiannya, tetapi tidak tajam lagi.



Gambar 3. Pengaruh Persentase *Slag* terhadap *Setting Time*

Pengaruh Penambahan *Slag* pada Pemuaiannya dalam *Autoclave*

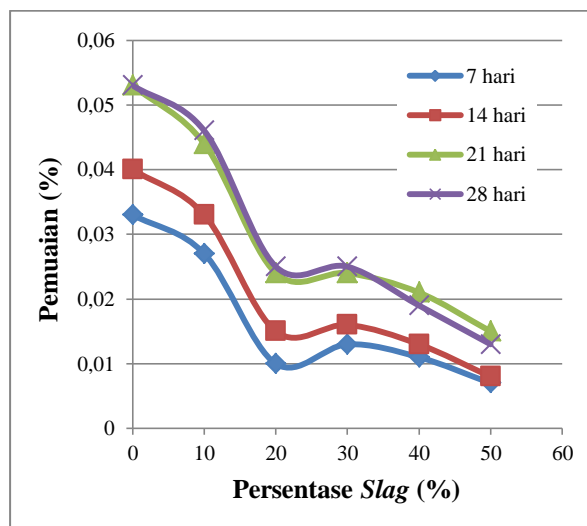


Gambar 4. Pengaruh Persentase *Slag* terhadap Pemuaiannya dalam *Autoclave*

Portland Jenis-I yang diuji dalam penelitian ini memenuhi standar dengan nilai pemuaiannya di bawah maksimum 0,8% menurut SNI 2049-2015. Sedangkan penambahan *slag* dapat menurunkan nilai pemuaiannya dalam *autoclave*. Penurunan nilai pemuaiannya ini mungkin disebabkan karena *slag* merupakan *pozzolan* yang memiliki kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 tinggi, serta memiliki ikatan lebih rapat atau pejal.

Pengaruh Penambahan *Slag* pada Pemuaiannya Karena Sulfat

Penambahan *slag* juga mengakibatkan penurunan pemuaiannya karena sulfat. Hasil percobaannya disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Pengaruh Persentase *Slag* terhadap Pemuaiannya Akibat Penambahan Sulfat

Penambahan *slag* ternyata juga menurunkan secara nyata pemuaiannya akibat sulfat. Penurunan tajam teramati sampai penambahan *slag* 20%, dan terus turun walaupun tidak terlalu tajam. Pola penurunan mirip untuk umur 7, 14, 21 dan 28 hari. Sampai penambahan *slag* 50% pada penelitian ini, pemuaiannya akibat sulfat turun dengan jelas:

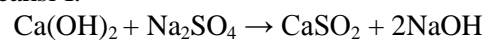
- untuk umur pengikatan 7 hari: pemuaiannya turun dari 0,33 mm (tanpa *slag*) menjadi 0,007 mm
- umur 14 hari: dari 0,041 mm (tanpa *slag*) menjadi 0,008 mm
- umur 21 hari: dari 0,053 mm (tanpa *slag*) menjadi 0,015 mm
- umur 28 hari: dari 0,053 mm (tanpa *slag*) menjadi 0,015 mm.

Menurut SNI 2049-2015 pemuaiannya maksimum akibat sulfat adalah 0,040%. Jadi penambahan *slag* ke dalam semen Portland Jenis-I tidak menimbulkan permasalahan pada aspek pemuaiannya dengan sulfat.

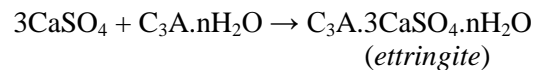
Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, *slag* bersifat *pozzolanik* karena kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 yang tinggi, serta ikatan lebih rapat. Sehingga dengan umur pengikatan makin lama, benda uji mortar akan makin tahan terhadap sulfat, atau dengan perkataan lain potensi sulfat untuk masuk dan merusak pasta semen makin kecil. Pemuaiannya akibat sulfat ini penting karena hampir semua sulfat merusak pasta semen, termasuk sulfat yang mungkin terkandung dalam tanah alkali.

Mekanisme pemuaiannya akibat sulfat kira-kira sebagai berikut. Sulfat bereaksi dengan kapur yang sudah terhidrasi ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dan kalsium aluminat hidrat di dalam pasta semen. Hasil reaksinya adalah kalsium sulfat dan kalsium sulfoaluminat yang merupakan mineral kristalin berbentuk jarum dan mengembang yang akhirnya mengakibatkan pemuaiannya pasta dan peretakan benda uji [7, 8].

Reaksi I:



Reaksi II:



Selanjutnya, *gypsum* (CaSO_4) bereaksi dengan kalsium aluminat hidrat dan menghasilkan *ettringite* (kalsium sulfoaluminat). C_3A juga dapat bereaksi dengan sulfat menghasilkan *ettringite* (kalsium sulfoaluminat). Reaksi-reaksi inilah yang mengakibatkan benda uji mengembang atau mengalami pemuaiannya.

Slag dan juga *fly ash* yang bersifat seperti *pozzolan* dapat membantu mengurangi serangan sulfat, sebagaimana terbukti dalam penelitian ini. Dengan demikian, pemanfaatan *slag* dapat mengubah sifat pemuaiannya terhadap sulfat semen Portland-I menjadi mirip semen Portland Jenis-V yang memang disediakan untuk menyelesaikan permasalahan sulfat.

Berdasarkan nilai pemuaiannya pada Gambar 5, penambahan *slag* dapat menurunkan berat jenis semen Portland Jenis-I. Hal ini terlihat dari hasil pengujian, bahwa berat jenis semen Portland Jenis-I adalah $3,0574 \text{ g/cm}^3$, sedangkan berat jenis *slag* adalah $2,8700 \text{ g/cm}^3$.

KESIMPULAN

Penelitian ini telah membuktikan bahwa penambahan *slag* ke dalam semen Portland Jenis-I dapat menaikkan kuat tekan yang terlihat jika umur pengikatan makin lama. Penambahan *slag* dapat menurunkan sifat pemuai yang diakibatkan pemanasan (uji di dalam *autoclave*) dari 0,168% (semen tanpa *slag*) menjadi 0,004% (50% *slag*). Penambahan *slag* juga memberikan ketahanan lebih baik terhadap serangan sulfat dari 0,053 % menjadi 0,013 % (pada pengujian umur pengikatan 28 hari).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Balai Besar Bahan dan Barang Teknik serta staf di laboratorium semen atas dukungan dan bantuan yang diberikan dalam pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Samsuri, Ngudi, T, dan Chauliah, F. P., "Pengaruh Granulated Blast Furnace Slag dalam Semen Terhadap Kapasitas Produksi, Kuat Tekan Mortar dan Nilai Ekonomis: Studi Kasus di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk", *Widya Teknika*, 24(2), 67-71, 2016.
- [2] Qureshi, M. N., dan Somnath, G, "Effect of Curing Conditions on The Compressive Strength and Microstructure of Alkali-Activated GGBS Paste", *International Journal of Engineering Science Invention*, 2(2), 24-31, 2013.
- [3] Akram, M. R., and Saim, R., "Effect of Micro Silica and GGBS on Compressive Strength and Permeability of Impervious Concrete as a Cement Replacement", *European Academic Research*, 3(7), 7456-7468, 2015.
- [4] Hirde, S., dan Pavin, G., "Effect of Addition of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) on Mechanical Properties of Fibre Reinforced Concrete", *International Journal of Current Engineering and Technology*, 5(3), 1678-1682, 2015.
- [5] Richardson, D. N., "Strength and Durability Characteristic of a 70% Ground Granulated Blast Furnace Slag (GBBFS) Concrete Mix", *Organization Result Research Report*, University of Missouri-Rolla, 2006.
- [6] Roy, D. M., dan GM., Idorn, "Hydration, Structure, and Properties of Blast Furnace Slag Cements, Mortars, and Concrete", *ACI Journal Proceeding*, 79(6), 444-457, 1982.
- [7] Chen, W dan H. J. H., Brouwers, "The Hydration of Slag", Part 1: Reaction Models for Alkali-Activated Slag, *Journal of Material Science*, 42, 428-443, 2007.
- [8] Chen, W dan H. J. H., Brouwers, "The Hydration of Slag", Part 2: Reaction Models for Blended Cement, *Journal of Material Science*, 42, 444-464, 2007.
- [9] "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cements Mortars Exposed to a Sulfate Solution", *ASTM C 1012-04*.
- [10] "Standard Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars", *ASTM C.989-04*.
- [11] "Standard Specification for Standard Sand", *ASTM C778-13*.