

PEMANFAATAN *PORTLAND COMPOSITE CEMENT* PADA CAMPURAN *SHOTCRETE* DENGAN *SILICA FUME* DAN *GROUND GRANULATED BLAST FURNACE*

Jul Endawati¹

¹Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung
Email :endawati03@gmail.com

ABSTRAK

Penggunaan *shotcrete* sebagai bahan konstruksi di banyak negara telah menjadi suatu hal yang menarik, karena potensi penghematan dalam biaya dan waktu konstruksi. *Shotcrete* juga diterapkan dalam konstruksi dan pemeliharaan struktur yang kompleks. Dalam aplikasinya, campuran *shotcrete* cenderung memanfaatkan *Ordinary Portland Cement* (OPC), sedangkan ketersediaan OPC di pasaran saat ini salah satunya sudah digantikan oleh *Portland Composite Cement* (PCC). Penelitian ini meninjau karakter campuran *shotcrete* dengan PCC sebagai pengikat utamanya dan dengan bahan tambah *Silica Fume* (SF) dan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS), secara eksperimental, dengan meninjau jumlah air campuran, waktu pengikatan, *length change* serta kuat tekan benda uji. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan PCC pada campuran *shotcrete* mempengaruhi jumlah air campuran. Waktu pengikatan awal paling cepat terjadi pada sampel uji dengan komposisi 92,5% PCC + 7,5% SF, sedangkan waktu pengikatan awal paling lama ditunjukkan oleh campuran 87,5% PCC + 12,5% SF, yaitu 165 menit. Kuat tekan terbesar diperoleh dari hasil pengujian campuran 88,7% PCC = 6,3% SF + 5% GGBFS. Hasil pengujian *length change* menunjukkan karakter yang tidak sama. Sebagian besar benda uji mengalami susut, dengan susut terbesar pada benda uji M5. Namun demikian, beberapa benda uji lainnya mengalami muai, dengan muai terbesar pada benda uji M1. Kuat lentur terbesar dimiliki oleh campuran M2 (6,95 Mpa), sedangkan terkecil dimiliki oleh campuran M5, yaitu sebesar 3,97 MPa. Penelitian ini merupakan penelitian awal yang perlu dikembangkan lebih lanjut secara eksperimen.

Kata Kunci: Karakteristik, *Shotcrete*, PCC, *Silica Fume*, GGBFS

ABSTRACT

The use of shotcrete in many countries has become of interest because of the potential savings in construction costs and time. Shotcrete is also applied in the construction and maintenance of complex structures. In its application, shotcrete mixtures tend to use Ordinary Portland Cement (OPC), while the current availability of OPC in the market has been replaced by Portland Composite Cement (PCC). This study examines the character of shotcrete mixture using PCC as the main binder, combined with Silica Fume (SF) and Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), experimentally, by observing the amount of mixed water, setting time, length change and compressive strength sample. Result of the flow tests show that the use of PCC in the shotcrete mixture affects the amount of mixed water of the test samples. The shortest initial setting time (97 mins) occurred in the test sample with a composition of 92.5% PCC + 7.5% SF, while the longest initial setting time (165 mins) was indicated by a mixture of 87.5% PCC + 12.5% SF. The highest compressive strength was obtained from the test results of 88.7% PCC = 6.3% SF + 5% GGBFS. The results of the length change test vary greatly. Most of the specimens experienced shrinkage, with the largest shrinkage in the M5 specimens. However, several other test objects experienced expansion, with the largest expansion in the M1 specimens. The largest flexural strength is shown from the average test result of M2 specimens (6.95 MPa), while the smallest is shown from the average test result of M5 specimens, which is 3.97 MPa. This study is initial research that needs to be further developed experimentally.

Keywords: Characteristics, *Shotcrete*, PCC, *Silica Fume*; GGBFS

1. PENDAHULUAN

Penggunaan *shotcrete* sebagai bahan konstruksi di banyak negara telah menjadi suatu hal yang menarik, karena potensi penghematan dalam biaya dan waktu konstruksi. *Shotcrete* terutama digunakan sebagai bahan pendukung utama untuk struktur bawah tanah, terowongan dan stabilisasi lereng. Di Eropa dan Amerika Utara, *shotcrete* digunakan pada struktur pelabuhan serta jenis struktur yang sulit diakses [1]. *Shotcrete* juga diterapkan dalam konstruksi dan pemeliharaan struktur yang kompleks.

Konstituen campuran *shotcrete* sama dengan beton normal, yaitu terutama semen Portland, agregat, dan air. Namun, untuk meningkatkan sifat mekanik, maka ditambahkan bahan lain. Penambahan bahan lain juga bertujuan untuk meningkatkan kemampuan kerja dan kemampuan pompa *shotcrete* dalam beberapa aplikasi. Bahan tambah yang dipakai pada umumnya terdiri

dari produk limbah industri *fly ash*, *silica fume* dan *ground granulated blast furnace slag*. Beton dengan bahan tambah yang bersifat sementitious, bagaimanapun, memiliki perilaku hidrasi yang berbeda [2]. ACI Comitte 506 [3] telah merekomendasikan batas penilaian untuk *shotcrete* untuk meminimalkan besarnya kering susut serta rebound pada saat *shotcreting*. *Shotcrete* yang diproduksi dengan agregat halus menunjukkan penyusutan pengeringan yang lebih besar, sedangkan *shotcrete* yang diproduksi dengan agregat kasar menghasilkan lebih banyak *rebound*.. Rasio air/semen *shotcrete* tergantung pada aplikasi lapangan, *Joulin-Boupiere* dalam tulisannya menyarankan tidak lebih dari 0,35 [4].

Sesuai ketentuan ACI 506, jenis semen yang digunakan adalah semen Portland normal. Pemakaian semen Portland normal ini juga banyak diaplikasikan pada beberapa pekerjaan *shotcrete* di Indonesia, seperti halnya pada pelaksanaan *shotcrete* proteksi lereng pada *inlet diversion tunnel* bendungan Cipanas, semen yang dipakai menggunakan semen tipe I yaitu Indocement Type I OPC [5]. Demikian pula halnya pada pekerjaan pembangunan *ring-road* Jayapura-Sentani [6] dan pekerjaan *shotcrete* di tambang bawah tanah *Grasberg Block Cave* di Papua [7].

Saat ini, semen Portland yang paling banyak beredar di pasaran adalah *Portland Composite Cement* (PCC) sesuai SNI 15-7064-2004 dan *Portland Pozzolan Cement* (PPC) sesuai SNI 15-0302-2004. Semen Tipe I atau *Ordinary Portland Cement* (OPC) sesuai SNI 15-2049-2004 yang dahulu seringkali digunakan untuk keperluan umum tidak lagi diproduksi masal dalam kemasan kecil dan hanya diproduksi dalam bentuk curah untuk melayani pesanan yang relatif terbatas. Kecenderungan pelaku konstruksi untuk memakai OPC dalam pelaksanaannya, menimbulkan pertanyaan dan masalah di lapangan seperti waktu pengikatan, karakteristik retak susut dan kekuatan beton setelah mengeras, serta komposisi eksak jumlah penambahan bahan posolan dan bahan lainnya ke dalam PPC/PCC [8]. Permasalahan tersebut sebetulnya dapat diatasi apabila pelaksana pekerjaan beton mengenal dan memahami sifat-sifat material penyusun beton terutama semen sebagai bahan pengikatnya. Meskipun persyaratan yang diatur relatif ketat, namun saat ini tidak semua pihak setuju bahwa semen PPC dan PCC setara untuk menggantikan OPC jika tanpa alasan yang cukup ilmiah.

PPC dan PCC adalah varian semen hidrolik yang tersusun atas campuran OPC dengan bahan lain yang berpartisipasi dalam reaksi hidrasi sehingga memberi kontribusi substansial terhadap hasil hidrasi semen. Kedua semen ini tergolong ke dalam semen gabungan atau *Blended Cement* sesuai ASTM C 595. Semen OPC dihasilkan dari klinker dan kalsium sulfat saja, sedangkan semen PCC diberi bahan-bahan tambahan lain, seperti abu terbang batu bara, butir terak tanur-tinggi (GGBFS), mikrosilika (SF), batu kapur (*limestone*), pozolan alami atau bahan lain yang dapat mempengaruhi proses hidrasi semen [9]. Sementara itu, semen PPC hanya mengizinkan penambahan bahan pozolan (*fly ash* atau pozolan alam) ke dalam campurannya.

Silica fume, sebagai salah satu bahan yang terdapat pada PCC, sering digunakan juga sebagai bahan campuran untuk *shotcrete*. *Silica fume*, produk sampingan limbah dari proses produksi logam silikon dan paduan, digunakan untuk meningkatkan kekuatan, daya tahan, dan keberlanjutan beton dan *shotcrete* (Sawoszczuk et al., 2013) [10]. Berat jenis relatif *silica fume* umumnya berkisar 2,2 – 2,5. Penggunaan *silica fume* dalam campuran beton dimaksudkan untuk menghasilkan beton dengan kekuatan tekan yang tinggi (Zai, 2014). Bahan ini memiliki kehalusan tinggi dengan ukuran partikel sekitar 0,1-0,3 μ m [11]; dengan demikian, dimungkinkan untuk mengamankan kekuatan dan daya tahan tinggi karena adanya reaksi *pozzolan*. *Silica fume* merupakan material yang bersifat *pozzollonic*. Dalam penggunaannya, *silica fume* berfungsi sebagai pengganti sebagian dari jumlah semen dalam campuran beton, yaitu sebanyak 5%-15% dari total berat semen. Hasil penelitian skala laboratorium yang dilakukan oleh Choi dkk. [12] mengukur pengaruh *air entrapped agent* dan *silica-fume* pada karakteristik rongga udara *shotcrete* campuran basah, sebelum dan sesudah proses *shotcreting*. Khususnya jika digunakan pada *shotcrete*, *silica fume* dapat meningkatkan viskositas beton dan menyebabkan fenomena *clogging*, yaitu fenomena *material-sliding* yang terjadi pada permukaan penuangan [13].

Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), sebagai bahan tambah lain yang juga bersifat sementitious, merupakan produk sampingan limbah dari proses produksi besi. Bahan ini telah banyak digunakan untuk mencapai kinerja tertentu dari *shotcrete*, termasuk waktu pengaturannya yang lebih lambat, generasi panas yang lebih rendah selama hidrasi, dan resistensi ion klorida yang lebih tinggi (Sawoszczuk et al., 2013). GGBFS memiliki kandungan utama CaO, SiO₂, Al₂O₃, dan MgO dengan kadar besi (Fe₂O₃) yang relative kecil. Besarnya kandungan utama dari GGBFS adalah CaO (30-50%), SiO₂ (28-38%), Al₂O₃ (8-24%) dan MgO (1-18%). Perilaku GGBFS dalam campuran bersifat reaktif dan memiliki tingkat kehalusan 3300 cm²/kg

Dalam aplikasinya, besarnya susut antara *shotcrete* dengan substrat merupakan hal yang penting. Tingginya susut berpotensi menimbulkan retak. Malmgren dkk. (2005) [14] mendapatkan besarnya uji susut tertahan dengan relatif lebih sedikit retakan yang terjadi pada kontak antara *shotcrete* dan substrat. Namun demikian, tipe dari persiapan permukaan substrat juga memiliki pengaruh yang signifikan pada kekuatan ikatan jangka panjang dari *shotcrete*.

Mengacu pada beberapa karakteristik bahan tambah serta karakter PCC, maka penelitian ini dengan demikian, bertujuan untuk melihat karakter campuran mortar berbasis komposisi *shotcrete* untuk keperluan perbaikan elemen beton, dengan memakai PCC, terutama untuk melihat waktu ikat, karakter susut yang merupakan karakter penting untuk *shotcrete*, serta karakter mekanis mortar keras. *Output* penelitian diharapkan dapat dipakai sebagai referensi acuan/standar pemakaian PCC untuk campuran *shotcrete* yang dibuat berdasarkan *template* ACI, karena penelitian dengan judul serupa belum pernah dilakukan.

2. MATERIAL DAN METODOLOGI

2.1 Material

Bahan pengikat utama yang dipakai adalah *Portland Composite Cement* produksi Tiga Roda. Bahan tambah yang dipakai sebagai substitusi sebagian PCC, yaitu *Silica Fume* produksi PT. SIKKA dan *Ground Granulated Blast Furnace Slag* yang berasal dari PT. Krakatau Steel serta *admixture superplasticizer* produk PT.SIKKA. Agregat halus menggunakan pasir silika standar. Sebelum dilakukan pengujian pada campuran uji dan benda uji mortar, dilakukan pengujian berat jenis bahan pengikat dan gradasi agregat. Gradasi agregat untuk campuran mengacu pada ketentuan *Grading No.1 ACI 506R-05*.

2.2 Metode, Rancangan Campuran Dan Benda Uji

Penelitian ini dilakukan secara eksperimen di laboratorium. Rancangan campuran mortar *shotcrete* dibuat berdasarkan *template* dua acuan referensi *mix design shotcrete* [15,16]. *Mix design* kedua yang diambil dari referensi WSDOT, merupakan *mix design* shotcrete dengan agregat kasar, dengan demikian dalam penentuan proporsinya disesuaikan untuk kebutuhan campuran mortar. Adapun bahan pengikat yang digunakan pada acuan yang pertama terdiri dari semen *Portland* dan SF, sementara acuan kedua menggunakan bahan pengikat semen *Portland*, SF, dan GGBFS. Dipakainya dua metode yang berbeda ini bertujuan untuk melihat pengaruh dari bahan pengikat tambahan tersebut pada campuran uji. Eksperimen uji merupakan campuran mortar. Mortar dibentuk menjadi benda uji untuk pengujian kuat tekan, berukuran 5cm x 5cm x 5cm (3 bh), pengujian susut bebas dengan ukuran benda uji 2cmx2cmx15cm (3 bh) dan pengujian *length change* dengan ukuran benda uji 2,5cmx2,5cmx30cm (3 bh), serta pengujian lentur dengan ukuran benda uji 2mx2cmx10cm (3bh). Jumlah benda uji tersebut adalah untuk setiap waktu pengujian dan setiap jenis campuran uji, dengan total benda uji untuk setiap campuran adalah 36 buah. Sebelum benda uji dibentuk, dilakukan pengujian *flow* terhadap campuran segar. Setelah itu dilakukan pengujian waktu ikat campuran.

Tabel 1. Notasi Dan Proporsi Bahan Pengikat Pada Campuran

No	Benda Uji	Proporsi Binder
1.	Mca	100% PCC
2.	M1	92,5% PCC + 7,5% SF
3.	M2	90% PCC + 10% SF
4.	M3	87,5% PCC + 12,5% SF
5.	Mcg	88,7% PCC + 6,3% SF + 5% GGBFS
6.	M4	86,5% PCC + 7,5% SF + 6% GGBFS
7.	M5	82% PCC + 10% SF + 8% GGBFS
8.	M6	77,5% PCC + 12,5% SF + 10% GGBFS

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pengujian Berat Jenis Bahan Pengikat

Pengujian berat jenis bahan pengikat dilakukan mengacu kepada ketentuan ASTM C128. Berat jenis bahan pengikat yang dipakai adalah sebagai berikut : PCC 2,98 gr/ml; GGBFS 2.89 gr/ml; dan Silica Fume yaitu sebesar 2,304 gr/ml.

3.2 Pengujian Keleccakan Campuran

Pengujian keleccakan dilakukan dengan memakai *flow table* mengacu pada ketentuan ASTM C1437-07, dengan ketentuan bahwa mortar uji harus memiliki derajat kecairan (*flow*) tertentu. Dalam pelaksanaan pembuatan mortar, secara aktual terdapat selisih antara air campuran rencana dengan air campuran yang diperlukan untuk tercapainya ketentuan pengujian *flow*. Setiap benda uji memiliki proporsi yang berbeda dan hal tersebut berpengaruh ke dalam jumlah air yang dibutuhkan tiap benda ujinya untuk mencapai keleccakan yang diinginkan.



Gambar 1. Pengujian *Flow* Mortar Campuran Uji

Dari perbedaan jumlah air tersebut dapat dilihat bahwa baik pada campuran tanpa bahan tambah maupun campuran dengan bahan tambah, pemakaian PCC mempengaruhi jumlah air campuran yang ditentukan komposisi campuran yang menjadi acuan (dengan OPC sebagai bahan pengikat utama). Pada saat ditambahkan SF ataupun GGBFS yang memiliki butiran yang lebih halus dari semen, maka jumlah air campuran yang diperlukan menjadi lebih besar, sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Selisih Kebutuhan Air Campuran Pada Pembuatan Mortar Uji

Benda Uji	Air (kg)			Penambahan Air (%)
	Rencana	Aktual	Selisih	
Mca	0.462	0.642	0.179	38.763
M1	0.467	0.668	0.202	43.212
M2	0.478	0.663	0.185	38.784
M3	0.488	0.662	0.174	35.524
Mcg	0.365	0.664	0.299	81.781
M4	0.376	0.663	0.287	76.364
M5	0.387	0.677	0.291	75.162
M6	0.397	0.683	0.285	71.828

3.3. Pengujian Waktu Ikat



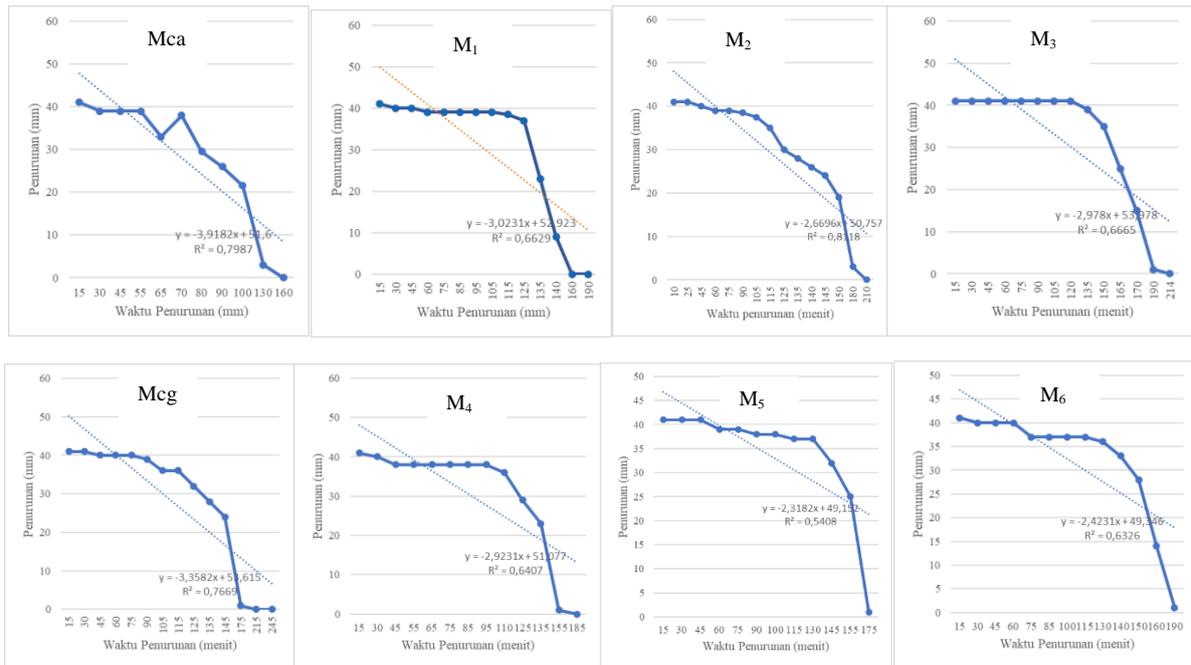
Gambar 2. Pengujian Waktu Ikat

Pada pengujian waktu ikat (ASTM C191), dilakukan beberapa kali percobaan dengan kadar air yang berbeda untuk mendapatkan konsistensi normal. Percobaan pertama kali air yang digunakan adalah 25% dari berat semen. Setiap percobaan harus dibuat dari semen yang baru dan selama percobaan alat-alat harus bebas dari getaran. Konsistensi normal yang didapat pada penurunan (10 ± 1) mm. Seperti halnya pada pengujian kelecakan campuran, maka pada pengujian ini juga terdapat koreksi air sebagaimana diberikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Selisih Air Campuran Aktual Terhadap Air Campuran Rencana

Benda Uji	Proporsi						
	Semen (gr)	Silica Fume (gr)	GGBFS (gr)	Jumlah (gr)	Air (gr)		
					Rencana	Aktual	Selisih
Mca	650	0	0	650	162.5	175	12.75
M1	601.25	48.75	0	650	162.5	186.2	23.7
M2	585	65	0	650	162.5	188.5	26
M3	568.75	81.25	0	650	162.5	195	32.5
Mcg	575.32	41.49	33.19	650	162.5	207.44	44.94
M4	568.75	48.75	32.5	650	162.5	198.6	36.1
M5	520	65	65	650	162.5	201.06	38.56
M6	536.25	81.25	97.5	715	178.75	222.75	44

Selisih jumlah air yang ditambahkan pada pengujian waktu ikat memberikan indikasi yang sama pada saat dilakukan pengujian *flow*, bahwa pemanfaatan SF dan GGBFS sebagai pengganti sebagian PCC, memerlukan penambahan air untuk tercapainya ketentuan konsistensi normal.



Gambar 3. Grafik Hubungan Penurunan Dan Waktu Penurunan Pada Pengujian Waktu Ikut.

Berdasarkan grafik pada Gambar 3 dan besaran waktu ikat pada Tabel 4, dapat dilihat bahwa waktu pengikatan awal (WPA) paling cepat terjadi pada sampel M1 = 90.7 menit. Substitusi bahan pengikat dengan 7,5% SF menyebabkan penurunan waktu ikat, jika dibandingkan dengan campuran Mca, dengan PCC sebagai bahan pengikat keseluruhan. Hingga batas substitusi 7,5% SF masih memberikan kontribusi perlambatan terhadap WPA campuran. Namun demikian, penambahan persentase SF lebih dari 7,5% dalam campuran bahan pengikat menyebabkan penambahan pada waktu pengikatan awal. Waktu pengikatan awal paling lama ditunjukkan oleh campuran M3, yaitu 165 menit. Waktu pengikatan awal Mcg sama dengan WPA M2 yaitu campuran dengan persentase SF 10%. Penambahan persentase GGBFS pada campuran uji memiliki karakter WPA serupa dengan campuran dengan peningkatan persentase SF. Pada campuran M5 yang memiliki persentase SF dalam bahan pengikat sebesar 10%, mulai terlihat perlambatan WPA akibat peningkatan persentase GGBFS. Pengaruh 12,5% SF pada campuran yang dapat memperlambat WPA, dapat ditahan oleh adanya substitusi GGBFS sebanyak 10%, sehingga WPA menjadi 4,55% lebih rendah jika dibandingkan dengan campuran dengan 12,5% tanpa GGBFS (M3).

Tabel 4. Waktu Ikut Tiap-tiap Campuran Uji

Benda Uji	Waktu Ikut (menit)	Benda Uji	Waktu Ikut (menit)
Mca	133,6	Mcg	142,5
M1	90,7	M4	131,6
M2	142,5	M5	155
M3	165	M6	157,5

3.4. Pengujian Length Change

Perubahan panjang diuji berdasarkan ketentuan ASTM C 157-93 *Length Change of Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*, dan ditinjau pada umur mortar 1,14 dan 28 hari. Jeda waktu di antara pengujian dilakukan curing terhadap benda uji.

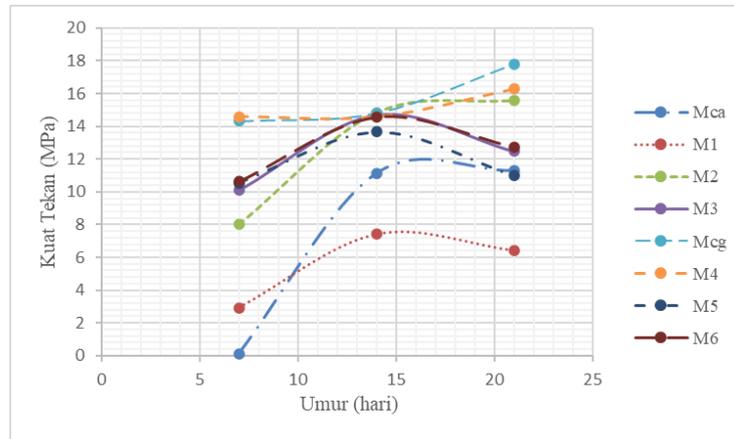
Tabel 5. Length Change Untuk Tiap-Tiap Benda Uji

Benda Uji	Length Change (%)	Benda Uj	Length Change (%)
Mca	-0,1051	Mcg	-0,2299
M1	0,0591	M4	-0,0591
M2	0,033	M5	-0,486
M3	-0,1314	M6	0,0263

Hasil pengujian *length change* menunjukkan karakter yang tidak sama. Sebagian besar benda uji mengalami susut, dengan susut terbesar pada benda uji M5. Namun demikian, beberapa benda uji lainnya mengalami muai, dengan muai terbesar pada benda uji M1. Namun demikian, nilai *length change* untuk semua benda uji hampir seluruhnya kurang dari 0,3%.

3.5. Pengujian Kuat Tekan.

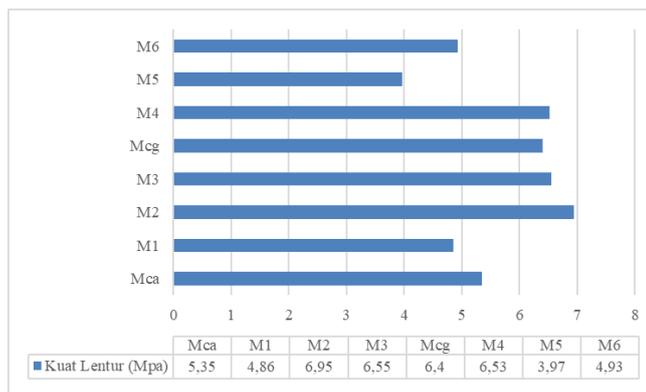
Pengujian kuat tekan dilakukan mengacu pada ketentuan SNI 03-6825-2002, pada umur 7,14, dan 21 hari. Pada umur 21 hari kuat tekan tertinggi diperoleh dari hasil pengujian benda uji Mcg, yaitu benda uji dengan komposisi bahan pengikat : 88,7% PCC + 6,3% SF + 5% GGBFS .



Gambar 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan Pada Umur 7,14 Dan 21 Hari

Pemakaian bahan bersifat sementitious ke dalam campuran mempengaruhi besarnya kuat tekan mortar uji jika dibandingkan dengan nilai kuat tekan campuran uji tanpa bahan tambah (Mca). Kuat tekan terbesar diperoleh dari hasil pengujian campuran Mcg, yaitu campuran dengan substitusi 5% GGBFS, dengan peningkatan sebesar 57,97%. Pada campuran dengan substitusi SF sebanyak 10% dalam campurannya, juga terjadi peningkatan kuat tekan terhadap campuran dasar, yaitu sebesar 38,16%. Namun peningkatan tersebut tidak bersifat linier dengan bertambahnya jumlah SF dalam campuran. Secara hasil, maka kuat tekan terbesar diperoleh dengan substitusi SF sebanyak 10% terhadap berat semen.

3.6. Pengujian Kuat Lentur.



Gambar 5. Hasil Pengujian Kuat Lentur Pada Umur 28 Hari.

Pengujian kuat lentur dilakukan pada umur 28 hari, mengacu pada ketentuan ASTM C293. Berdasarkan grafik pada Gambar 5, dapat dilihat bahwa kuat lentur terbesar dimiliki oleh campuran M2 (6,95 Mpa), sedangkan terkecil dimiliki oleh campuran M5, yaitu sebesar 3,97 MPa. Karakter kuat lentur tidak memberikan keterkaitan dengan hasil kuat tekan. Benda uji yang memiliki kuat tekan terbesar, memiliki kuat lentur 6,4 Mpa, atau 16% lebih tinggi dibandingkan kuat lentur benda uji referensi (Mca).

4. KESIMPULAN

- Penggunaan *Portland Composite Cement* pada campuran *shotcrete* yang mengacu pada template rancangan [1.2], mempengaruhi jumlah air campuran, baik pada campuran tanpa bahan tambah maupun campuran dengan bahan tambah.

- Waktu pengikatan awal paling cepat terjadi pada sampel M1 = 90.7 menit, sedangkan waktu pengikatan awal paling lama ditunjukkan oleh campuran M3, yaitu 165 menit.
- Pemakaian bahan bersifat sementitious ke dalam campuran mempengaruhi besarnya kuat tekan mortar uji jika dibandingkan dengan nilai kuat tekan campuran uji tanpa bahan tambah (Mca). Kuat tekan terbesar diperoleh dari hasil pengujian campuran Mcg, yaitu campuran dengan substitusi 5% GGBFS, dengan peningkatan sebesar 57,97%.
- Hasil pengujian *length change* menunjukkan karakter yang tidak sama. Sebagian besar benda uji mengalami susut, dengan susut terbesar pada benda uji M5. Namun demikian, beberapa benda uji lainnya mengalami muai, dengan muai terbesar pada benda uji M1.
- Kuat lentur terbesar dimiliki oleh campuran M2 (6,95 Mpa), sedangkan terkecil dimiliki oleh campuran M5, yaitu sebesar 3,97 MPa.
- Pemanfaatan di lapangan dengan demikian perlu mempertimbangkan beberapa karakteristik yang telah disebutkan di atas, dan disesuaikan dengan ketentuan konstruksi. Variasi komposisi bahan pengikat dapat dikembangkan untuk diteliti lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] EFNARC, *European Specification for Sprayed Concrete*, EFNARC: Farnham, UK, 2002
- [2] Monica Lundgreen et al. *State of The Art Report on Material Type, requirements and Durability Aspects of Sprayed Concrete*, RISE Report, 2018:08
- [3] ACI 506R-05, *Guide to Shotcrete*, American Concrete Institute, 2015
- [4] Marc Joulin et al, *Understanding Wet-Mix Shotcrete: Mix Design, Specifications and Placement, Surface Supprt Liners Conference*, Canada, 2003
- [5] Hidayat Nurashar, *Pelaksanaan Shotcrete Sebagai Proteksi Lereng Di Inlet Diversion Tunnel Bendungan Cipanas*, prosiding seminar Nasional Riset Terapan, 2020
- [6] Iis Rom Widiati et al, *Analisis Mutu Beton Shotcrete Pada Proyek Pembangunan Ring Road Jayapura-Sentani*, *Journal of Portal Civil Engineering*, Vol 2 No 1, Agustus 2019
- [7] Mahmud said, et al, *Analisis Teknis Penggunaan Shotcrete Pada Tambang Bawah Tanah Gasberg Block Cave (GBC) di PT Freeport Indonesia Provinsi Papua*, Prosiding TPT XXX, Perhapi, 2020
- [8] Lasino et al, *Kajian Penggunaan Semen Portland Komposit Untuk Beton*, *Jurnal teknologi Bahan dan Barang Teknik* 2(2):41, 2012
- [9] COQ Semen PCC, PT Semen Indonesia, 2020
- [10] Philip Saweszczuk et al, *Sustainable Shotcrete Using Blast Furnace Slag*, *Materials Science*, 2013
- [11] Choi, P.; Yeon, J.H.; Yun, K.K. *Air-void Structure, Strength, and Permeability of Wet-mix Shotcrete Before and After Shotcreting Operation: The influences of Silica fume and Air-entraining Agent*. *Cement Concrete Composites* 2016, 70, 69–77. [CrossRef]
- [12] Panesar, D.K.; Zhang, R. *Performance Comparison of Cement Replacing Materials in Concrete: Limestone fillers and supplementary cementing materials—A review*. *Constr. Build. Mater.* 2020, 251, 118866. [CrossRef]
- [13] Belkowitz, J.; Armentrout, D.L. *The Investigation of Nano Silica in the Cement Hydration Process*; SP-267; *ACI Special Publication*: Indianapolis, IN, USA, 2009; pp. 87–10
- [14] Malmgren, L, *Interaction between Shotcrete and Rock: Experimental and Numerical Study*, PhD Thesis, Lulea University of Technology, Lulea 2005
- [15] R. Caballero et al, *Design and Modelling, Seminario Internacional, Diseno y Durabilidad del Shotcrete*, 2013
- [16] *Washington State Department of Transportation (WSDOT) M41-10, Standard Specification for Road, Bridge and Municipal Construction*, 2012