

PEMANFAATAN LIMBAH SERBUK MARMER PADA BETON SEBAGAI BAHAN PENGGANTI SEBAGIAN SEMEN DENGAN VARIASI PENGGUNAAN *SILICA FUME*

Agil Fitri Handayani
Agoes Soehardjono M.D.
Achfas Zacoeb

Abstrak: Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* terhadap sifat mekanik beton. Penelitian ini menggunakan desain eksperimen dengan 16 kelompok benda uji dengan variasi serbuk marmer dan *silica fume* 0,00; 5,00; 10,00; dan 15,00%. Faktor air semen digunakan 0,50 dan *superplasticizer* dengan dosis rendah 0,50%. Perilaku beton segar diperhitungkan dan sifat mekanik beton diuji pada umur beton 28 hari. Hasil analisis menunjukkan komposisi utama serbuk marmer adalah Silikon Dioksida (SiO_2) 17,63% dan Kalsium Karbonat (CaCO_3) 2,73%. Serbuk marmer lebih tepat digunakan sebagai bahan pengisi atau *filler* dari pada sebagai pengganti semen. Sifat mekanik beton optimum dihasilkan pada campuran serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 6,22% dengan kuat tekan beton yang dihasilkan mencapai 29,04 MPa.

Kata-kata Kunci: serbuk marmer, sifat mekanik beton, *silica fume*

Abstract: *The Utilization of Marble Powder Waste in Concrete Materials as a Partial Material Substitution of Cement with the Variation Use of Silica Fume. The purpose of this study was to determine the effect of marble powder and silica fume on the mechanical properties of concrete. This study used an experimental design using 16 group of testing materials with variety types of mixtures between marble powder and silica fume 0.00; 5.00; 10.00; and 15.00%. The water-cement ratio was 0.50 and a low dosage of superplasticizer, which was 0.50%. The behavior of fresh concrete were calculated and the mechanical properties of concrete were tested on concrete age of 28 days. The results showed the marble powder main composition was Silicon Dioxide (SiO_2) 17.63% and Calcium Carbonate (CaCO_3) 2.73%. Marble powder was more appropriate to be used as fillers than to be used as a partial substitution of cement. The optimum mechanical properties of concrete was produced by the mixtures of 5.00% marble powder and 6.22% silica fume which resulted in compressive strength of 29.04 MPa.*

Keywords: *marble powder, mechanical properties of concrete, silica fume*

Penambangan dan pengolahan batu marmer di Indonesia tersebar di beberapa pulau. [Tulungagung](#) adalah salah satu daerah penghasil marmer terlama

Agil Fitri Handayani adalah mahasiswa Program Magister Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang. Email: agil_handayani@yahoo.com. Agoes Soehardjono, M.D. dan Achfas Zacoeb adalah dosen Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang. Alamat Kampus: Jl. MT. Haryono No.167 Malang 65145.

dan terbesar di Indonesia. Kegiatan penambangan batu marmer yang terbesar dilakukan oleh PT. Industri Marmer Indonesia Tulungagung dengan wilayah penambangan seluas 5,93 Ha dan produksi 9,90 juta ton/tahun. Selain itu terdapat sekitar 150 unit usaha kecil dan menengah yang bergerak dibidang pengolahan batu marmer dengan produksinya yang mencapai 2.250 ton/hari (Herman, 2005).

Pengolahan batu marmer dalam jumlah besar dan terus-menerus menimbulkan permasalahan pada besarnya limbah yang dihasilkan. Sistem penampungan limbah pada lahan terbuka disekitar tempat pengolahan kurang efektif dan kurang memperhatikan konservasi lahan. Karenanya perlu dilakukan penanganan masalah limbah ini. Kegiatan pengolahan batu marmer menghasilkan limbah berupa pecahan batu marmer dan serbuk marmer sekitar 40,00% dari produk akhir industri marmer (Shirule, dkk., 2012).

Penelitian dilakukan untuk menyelidiki kemungkinan penggunaan serbuk marmer pada beton. Penelitian menunjukkan nilai kuat tekan beton dengan substansi serbuk marmer 10,00% sebagai pengganti sebagian semen atau pasir, menunjukkan tidak ada penurunan kekuatan tekan beton pada umur 28 hari (Corinaldesi, dkk., 2005). Penggunaan serbuk marmer sebagai bahan pengganti sebagian semen pada beton menunjukkan kuat tekan meningkat 17,70% pada umur beton 28 hari dicapai dengan mengganti 10,00% berat semen dengan serbuk marmer (Shirule, dkk., 2012).

Penambahan bahan mineral pada beton secara umum akan mempengaruhi kinerja beton segar dan sifat mekanik beton. Karena itu dilakukan pengamatan terhadap campuran beton dengan variasi penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* pada faktor air semen 0,50. *Superplasticizer* dengan dosis 0,50% ditambahkan untuk meningkatkan workabilitas.

Pengamatan terhadap sifat fisika dan sifat kimia serbuk marmer dilakukan untuk mengetahui kemungkinan penggunaan serbuk marmer pada beton. Pengaruh penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* terhadap sifat beton segar diamati dan sifat mekanik beton diuji pada umur 28 hari.

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat berupa salah satu solusi penanganan masalah limbah. Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* terhadap sifat mekanik beton.

METODE

Penelitian menggunakan semen portland pozzolan tipe IP-U memenuhi persyaratan ASTM C 595-03 (2007). Spesifikasi semen portland pozzolan ditunjukkan pada Tabel 1.

Pada penelitian ini agregat halus berupa pasir sungai dan agregat kasar digunakan batu pecah dengan ukuran butir maksimum 20 mm. Agregat yang digunakan merupakan agregat alam berasal dari

Tabel 1. Spesifikasi PPC Tipe IP-U

Jenis Pengujian	ASTM C 595 - 03	Hasil Pengujian
Kalsium Oksida (CaO), %	-	58,66
Silikon Dioksida (SiO ₂), %	-	23,13
Aluminium Oksida (Al ₂ O ₃), %	-	8,76
Ferri Oksida (Fe ₂ O ₃), %	-	4,62
Sulfur Trioksida (SO ₃), %	≤ 3,50	2,18
Magnesium Oksida (MgO), %	≤ 6,00	0,90
Hilang Pijar (LOI), %	≤ 3,00	1,69
Waktu pengikatan Awal, menit	≥ 45	153
Waktu pengikatan Akhir, menit	≤ 375	249

(Sumber: Semen Gresik, 2013)

Kabupaten Lumajang. Spesifikasi agregat yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Agregat

Sifat Agregat	Agregat Halus	Agregat Kasar
Berat jenis kering	2,70	2,56
Berat jenis SSD	2,73	2,67
Penyerapan air (%)	1,08	3,47
Kadar air (%)	3,79	1,08
Kadar lumpur (%)	0,57	2,38
Modulus kehalusan	3,91	6,45

Serbuk marmer (MP) yang digunakan berasal dari Kabupaten Tulungagung. Secara fisika serbuk marmer berwarna putih terang dan mempunyai berat jenis 2,79. Serbuk marmer mempunyai ukuran butir yang halus dengan 100,00% butirannya lolos ayakan Nomor 200 berdiameter 0,08 mm. Secara fisika serbuk marmer dapat dilihat pada Gambar 1.

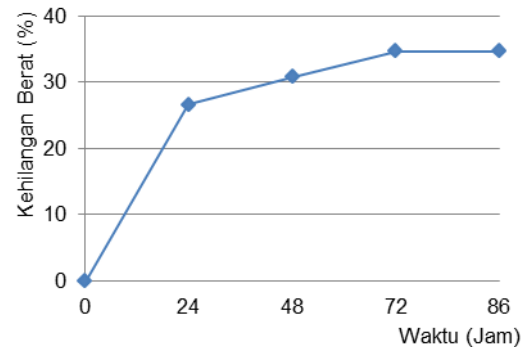


Gambar 1. Serbuk Marmer

Sebelum digunakan pada beton serbuk marmer dikeringkan dengan cara di oven pada suhu $110^{\circ}\pm 5^{\circ}\text{C}$. Berat konstan serbuk marmer diperoleh setelah di oven selama 72 jam dengan kehilangan berat sebesar 34,67%. Kehilangan berat pada serbuk marmer ditunjukkan Gambar 2.

Pengujian komposisi kimia serbuk marmer dilaksanakan dengan beberapa metode. Metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (ASS) digunakan untuk

menentukan komposisi Kalsium (Ca), Ferrum (Fe) dan Magnesium (Mg). Metode Gravimetri digunakan untuk menentukan komposisi Silikon (Si) dan untuk menentukan komposisi Aluminium (Al)



Gambar 2. Kehilangan Berat Serbuk Marmer

digunakan metode Spektrofotometri.

Hasil analisis kimia menunjukkan komposisi serbuk marmer adalah Silikon Dioksida (SiO_2) sebesar 17,63%, Kalsium Karbonat (CaCO_3) sebesar 2,73% dan beberapa unsur lainnya. Komposisi kimia serbuk marmer ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi Kimia Serbuk Marmer

Unsur Kimia	Kandungan (%)
Silikon Dioksida (SiO_2)	17,63
Kalsium Karbonat (CaCO_3)	2,73
Kalsium Oksida (CaO)	1,53
Magnesium Karbonat (MgO_3)	0,20
Magnesium Oksida (MgO)	0,09
Ferri Oksida (Fe_2O_3)	0,01
Alumunium Dioksida (AlO_3)	0,002

Penelitian ini menggunakan *silica fume* (SF) Masterlife SF 100 yang memenuhi persyaratan pada ASTM C 1240-04 (ASTM, 2007). Spesifikasi *silica fume* ditunjukkan pada Tabel 4.

Menurut ASTM C 494 (dalam ASTM, 2007) termasuk dalam bahan tambahan *Type F Superplasticizer* (SP) dalam penelitian ini digunakan Sika-ment[®]LN dengan dosis 0,50% (Sika, 2010). Cara aplikasi dan spesifikasi su-

perplasticizer ditunjukkan pada Gambar 3 dan Tabel 5.

Tabel 4. Spesifikasi Silica Fume

Sifat-sifat	ASTM 1240 - 05	Spesifikasi
Warna	-	Abu-abu
Silikon Dioksida (SiO ₂), (%)	≥ 85	95
Bulk density (kg/m ³)	-	2100 2300

(Sumber: BASF, 2012)



Gambar 3. Superplasticizer

Benda uji berbentuk silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Campuran dibuat dalam 16 (enam belas) kelompok benda uji dengan variasi serbuk marmar dan *silica fume* 0,00; 5,00; 10,00; dan 15,00% dengan faktor air semen 0,5 serta *superplasticizer* 0,50% dari berat semen. Variasi campuran dan jumlah benda uji ditunjukkan Tabel 6.

Tabel 5. Spesifikasi Superplasticizer

Sifat-sifat	Spesifikasi
Warna	Coklat tua
<i>Specific Gravity</i>	1,18 – 1,20

(Sumber: Sika, 2010)

Perencanaan dan perawatan beton dapat dijelaskan sebagai berikut. Perencanaan campuran beton normal dilaksanakan berdasarkan pada SNI 03-2834-2000 (2000) dengan kuat tekan beton yang direncanakan 20 MPa. Untuk memperoleh nilai kuat tekan yang direncanakan dilakukan perawatan beton dengan

cara perendaman sampai waktu pengujian beton 28 hari.

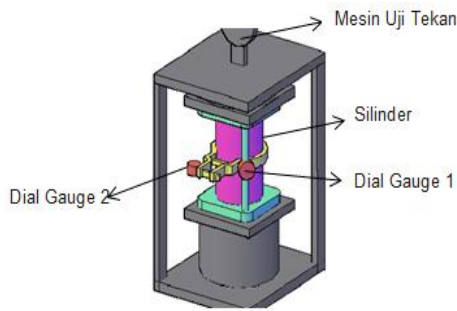
Untuk mengetahui kinerja beton segar dilakukan pengujian waktu pengikatan (*setting time*) dan pengujian *slump*. Metode pengujian waktu pengikatan pasta semen sesuai dengan ASTM C 403 (ASTM, 2007) dan metode pengujian *slump* berdasarkan SNI 1972-2008 (2008). Pengujian kuat tekan beton dilakukan dengan cara memberikan beban sampai benda uji hancur. Metode pengujian kuat tekan berdasarkan pada ASTM C39-04a (ASTM, 2007).

Tabel 6. Variasi dan Jumlah Benda Uji

Kode Benda Uji	Jumlah Serbuk Marmar (%)	Jumlah Silica Fume (%)	Jumlah Benda Uji
I A	0,00	0,00	3
I B	0,00	5,00	3
I C	0,00	10,00	3
I D	0,00	15,00	3
II A	5,00	0,00	3
II B	5,00	5,00	3
II C	5,00	10,00	3
II D	5,00	15,00	3
III A	10,00	0,00	3
III B	10,00	5,00	3
III C	10,00	10,00	3
III D	10,00	15,00	3
IV A	15,00	0,00	3
IV B	15,00	5,00	3
IV C	15,00	10,00	3
IV D	15,00	15,00	3

Pengujian modulus elastisitas dan angka Poisson dilaksanakan dengan mengukur regangan longitudinal dan regangan transversal benda uji pada beban 40,00% dari beban maksimum. Metode pengujian modulus elastisitas *Chord* dan angka Poisson berdasarkan rekomendasi ASTM C 469 (ASTM, 2007). *Setting up* pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.

Hasil eksperimen kemudian dibandingkan dengan pendekatan teoritis. Kuat tekan karakteristik beton diperoleh dengan menggunakan rumusan berdasarkan



Gambar 4. *Setting Up*

SNI 03–2834–2000 (2000). Campuran beton normal hubungan antara modulus elastisitas dan kuat tekan beton dapat ditentukan berdasarkan SNI 03–2847–2002 (2002).

Pengujian hipotesis dapat dijelaskan sebagai berikut. Analisis varian dua faktor dilakukan untuk mengetahui pengaruh variabel *independent* (serbuk marmer dan *silica fume*) terhadap variabel *dependent* sifat mekanik beton (kuat tekan, modulus elastisitas, dan angka Poisson). Variabel *independent* dinyatakan berpengaruh terhadap variabel *dependent* jika nilai F_{hitung} lebih besar dari pada $F_{tabel} = 3,20$ pada signifikan $\alpha = 0,05$.

HASIL

Pengaruh *initial setting time* dapat dijelaskan sebagai berikut. Hasil pengujian *initial setting time* campuran beton normal adalah 120 menit. Penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* pada umumnya menyebabkan *initial setting time* pasta semen menjadi lebih lama. Hasil pengujian *initial setting time* ditunjukkan pada Tabel 7.

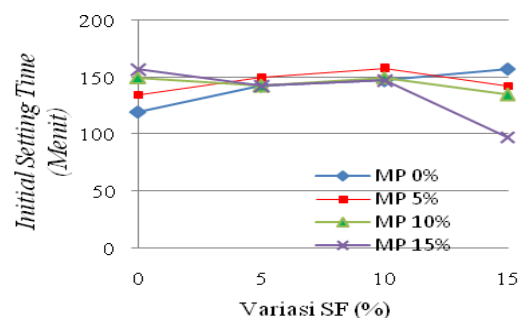
Intial setting time terlama ditunjukkan oleh campuran dengan penggunaan serbuk marmer 0,00% dan *silica fume* 15,00% yaitu 157,50 menit. Campuran dengan serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 15,00% menunjukkan *initial setting time* 97,50 menit. Pada campuran dengan serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 15,00% *intial setting time* menjadi lebih cepat hal ini karena butiran serbuk mar-

mer dan *silica fume* yang halus sehingga memiliki luas permukaan spesifik besar dan kemungkinan terjadi reaksi semakin besar yang pada akhirnya mempercepat waktu pengikatan. Semua variasi campuran memenuhi persyaratan pada ASTM C 595 (ASTM, 2007), *initial setting time* pada PPC harus lebih dari 45 menit. Hasil pengujian *initial setting time* dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 7. Hasil Pengujian *Initial Setting Time*

Kode Benda Uji	FAS	SP (%)	MP (%)	SF (%)	Waktu (menit)
I A	0,50	-	-	-	120,00
I B	0,50	0,50	-	5,00	142,50
I C	0,50	0,50	-	10,00	147,50
I D	0,50	0,50	-	15,00	157,50
II A	0,50	0,50	5,00	-	135,00
II B	0,50	0,50	5,00	5,00	150,00
II C	0,50	0,50	5,00	10,00	157,50
II D	0,50	0,50	5,00	15,00	142,50
III A	0,50	0,50	10,00	-	150,00
III B	0,50	0,50	10,00	5,00	142,50
III C	0,50	0,50	10,00	10,00	150,00
III D	0,50	0,50	10,00	15,00	135,00
IV A	0,50	0,50	15,00	-	157,00
IV B	0,50	0,50	15,00	5,00	142,50
IV C	0,50	0,50	15,00	10,00	147,50
IV D	0,50	0,50	15,00	15,00	97,50

Pengaruh *final setting time* dapat dijelaskan sebagai berikut. Waktu pengikatan menjadi lebih lama dengan penggunaan serbuk marmer dan *silica fume*. *Final setting time* campuran beton normal tanpa bahan tambahan adalah 240



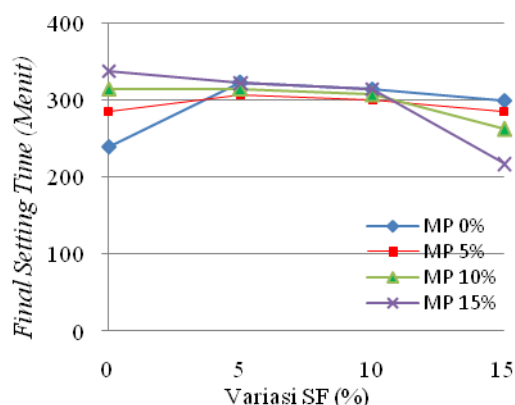
Gambar 5. Hasil Pengujian *Initial Setting Time*

menit. Campuran dengan penggunaan serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 0,00% menunjukkan *final setting time* paling lama yaitu 337,50 menit. *Final setting time* tercepat diperoleh pada campuran dengan serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 15,00% yaitu 217,50 menit. Hasil pengujian *final setting time* ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pengujian *Final Setting Time*

Kode Benda Uji	FAS	SP (%)	MP (%)	SF (%)	Waktu (menit)
I A	0,50	-	-	-	240,00
I B	0,50	0,50	-	5,00	322,50
I C	0,50	0,50	-	10,00	315,00
I D	0,50	0,50	-	15,00	300,00
II A	0,50	0,50	5,00	-	285,00
II B	0,50	0,50	5,00	5,00	307,50
II C	0,50	0,50	5,00	10,00	300,00
II D	0,50	0,50	5,00	15,00	285,00
III A	0,50	0,50	10,00	-	315,00
III B	0,50	0,50	10,00	5,00	315,00
III C	0,50	0,50	10,00	10,00	307,50
III D	0,50	0,50	10,00	15,00	262,50
IV A	0,50	0,50	15,00	-	337,50
IV B	0,50	0,50	15,00	5,00	322,50
IV C	0,50	0,50	15,00	10,00	315,00
IV D	0,50	0,50	15,00	15,00	217,50

Hasil pengujian menunjukkan semua variasi campuran memenuhi persyaratan pada ASTM C 595 (ASTM, 2007), *final setting time* untuk pasta semen PPC tidak boleh lebih dari 375 menit. Hasil pengujian



Gambar 6. Hasil Pengujian *Final Setting Time*

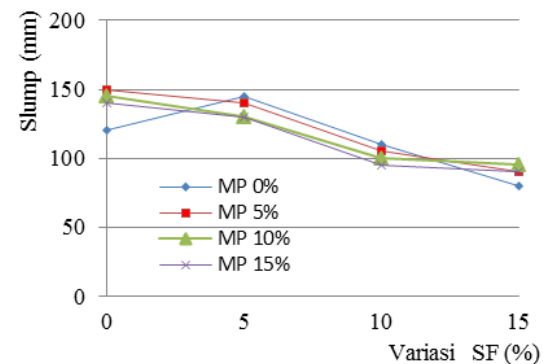
an *final setting time* pasta semen dapat dilihat pada Gambar 6.

Pengaruh pengujian *slump* dapat dijelaskan sebagai berikut. Tingkat kemudahan beton untuk dikerjakan ditunjukkan dengan nilai *slump*. Nilai *slump* untuk campuran beton normal tanpa penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* adalah 120 mm. *Slump* terendah ditunjukkan oleh campuran dengan serbuk

Tabel 9. Hasil Pengujian *Slump*

Kode Benda Uji	FAS	SP (%)	MP (%)	SF (%)	<i>Slump</i> (mm)
I A	0,50	-	-	-	120,00
I B	0,50	0,50	-	5,00	145,00
I C	0,50	0,50	-	10,00	110,00
I D	0,50	0,50	-	15,00	80,00
II A	0,50	0,50	5,00	-	150,00
II B	0,50	0,50	5,00	5,00	140,00
II C	0,50	0,50	5,00	10,00	105,00
II D	0,50	0,50	5,00	15,00	95,00
III A	0,50	0,50	10,00	-	145,00
III B	0,50	0,50	10,00	5,00	130,00
III C	0,50	0,50	10,00	10,00	100,00
III D	0,50	0,50	10,00	15,00	95,00
IV A	0,50	0,50	15,00	-	140,00
IV B	0,50	0,50	15,00	5,00	130,00
IV C	0,50	0,50	15,00	10,00	95,00
IV D	0,50	0,50	15,00	15,00	90,00

marmer 0,00% dan *silica fume* 15,00% yaitu 80 mm. Campuran serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 0,00% memberikan nilai *slump* tertinggi 150 mm. Hasil pengujian *slump* pada campuran beton ditunjukkan Tabel 9.



Gambar 7. Hasil Pengujian *Slump*

Hasil pengujian menunjukkan nilai *slump* untuk seluruh campuran memenuhi persyaratan *slump* untuk pekerjaan beton struktural antara 75 mm sampai dengan 150 mm. Nilai *slump* mengalami penurunan sebanding dengan jumlah serbuk marmer dan *silica fume*. Penggunaan *superplasticizer* sebesar 0,50% mempunyai pengaruh yang baik terhadap *slump*. Hasil pengujian *slump* ditunjukkan pada Gambar 7.

Pengaruh kuat tekan dapat dijelaskan sebagai berikut. Pengujian kuat tekan beton dilaksanakan dengan menerapkan beban secara bertahap pada benda uji silinder beton. Hasil pengujian kuat tekan berbagai variasi serbuk marmer dan *silica fume* seperti yang ditunjukkan Tabel 10.

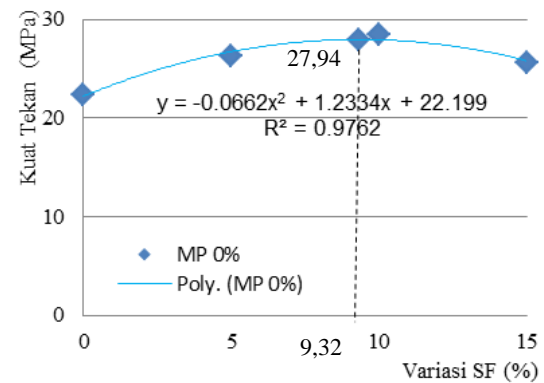
Tabel 10. Hasil Pengujian Kuat Tekan (f'c)

Kode Benda Uji	FAS	SP (%)	MP (%)	SF (%)	f'c rerata (MPa)
I A	0,50	-	-	-	22,36
I B	0,50	0,50	-	5,00	26,21
I C	0,50	0,50	-	10,00	28,40
I D	0,50	0,50	-	15,00	25,63
II A	0,50	0,50	5,00	-	25,31
II B	0,50	0,50	5,00	5,00	26,38
II C	0,50	0,50	5,00	10,00	29,84
II D	0,50	0,50	5,00	15,00	19,12
III A	0,50	0,50	10,00	-	23,25
III B	0,50	0,50	10,00	5,00	27,27
III C	0,50	0,50	10,00	10,00	25,84
III D	0,50	0,50	10,00	15,00	22,72
IV A	0,50	0,50	15,00	-	21,76
IV B	0,50	0,50	15,00	5,00	26,95
IV C	0,50	0,50	15,00	10,00	19,82
IV D	0,50	0,50	15,00	15,00	17,55

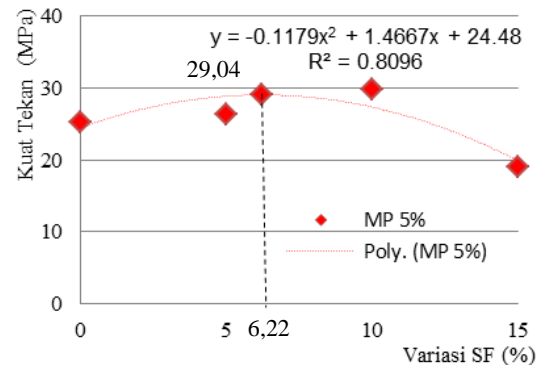
Penggunaan serbuk marmer sebagai pengganti sebagian semen tanpa *silica fume* menunjukkan adanya pengaruh pada kuat tekan beton. Penggunaan *silica fume* tanpa serbuk marmer juga menunjukkan peningkatan pada kuat tekan. Penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* secara bersama-sama menunjukkan hasil kuat tekan yang lebih baik dari pada

digunakan secara terpisah. Hubungan antara variasi *silica fume* dan kuat tekan ditunjukkan Gambar 8, 9, 10, dan 11.

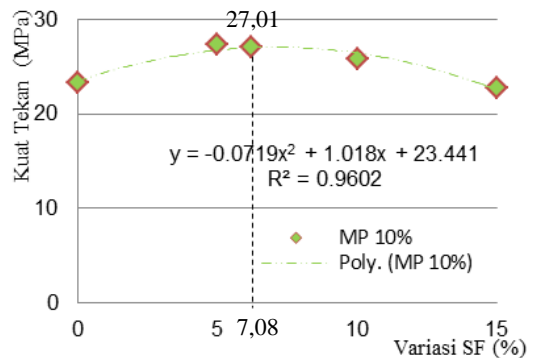
Gambar 8 menunjukkan bahwa penggunaan *silica fume* tanpa serbuk marmer mencapai kuat tekan optimum pada 9,31% dari berat semen dengan kuat tekan yang dihasilkan 27,94 MPa. Penggunaan serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 6,22% menunjukkan kuat tekan op-



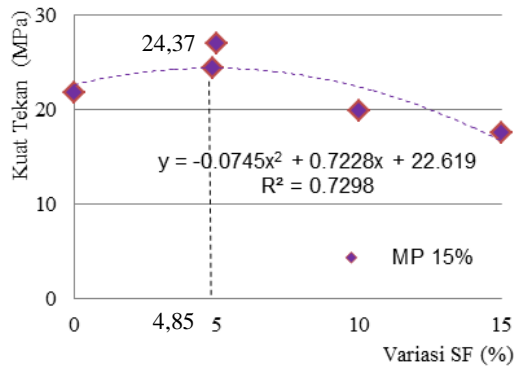
Gambar 8. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi SF dengan MP 0,00%



Gambar 9. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi SF dengan MP 5,00%

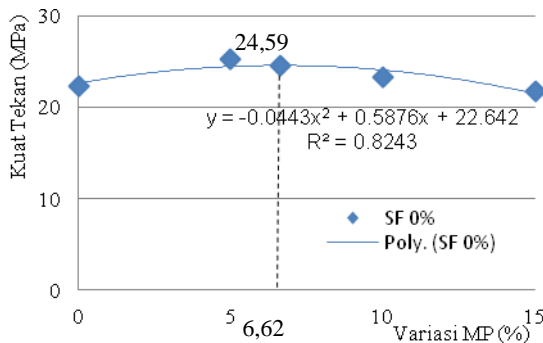


Gambar 10. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi SF dengan MP 10,00%



Gambar 11. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi SF dengan MP 15,00%

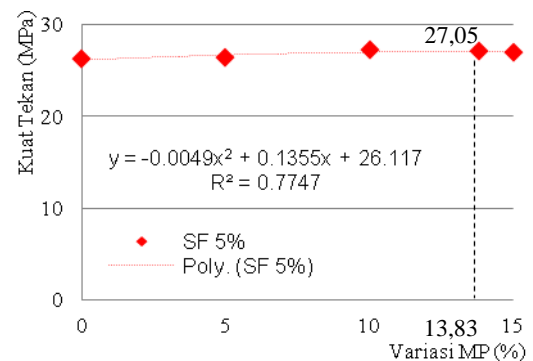
timum 29,04 MPa ditunjukkan pada Gambar 9. Pada serbuk marmer 10,00% akan mencapai kuat tekan optimum jika digunakan bersama dengan *silica fume* sebanyak 7,08% terlihat pada Gambar 10. Penggunaan serbuk marmer 15,00% dengan *silica fume* 4,85% menunjukkan kuat tekan maksimum 24,37 MPa. Untuk mengetahui hubungan antara variasi serbuk marmer dan kuat tekan pada berbagai variasi *silica fume* pada Gambar 12, 13, 14, dan 15.



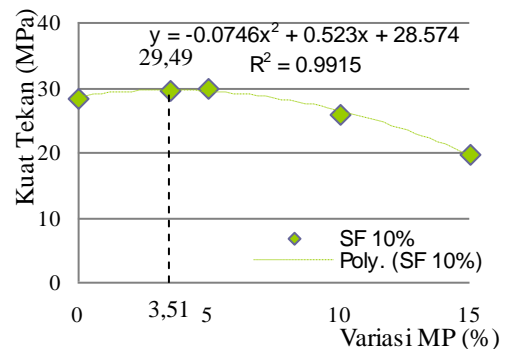
Gambar 12. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi MP dengan SF 0,00%

Penggunaan serbuk marmer tanpa *silica fume* kuat tekan optimum 24,59 MPa dihasilkan pada persentase serbuk marmer 6,62% terlihat pada Gambar 12. Penggunaan serbuk marmer 13,85% dan *silica fume* 5,00% menunjukkan kuat tekan 27,05 MPa. Penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* bersama-sama menunjukkan hasil optimum pada persentase serbuk marmer 3,51 dan *silica fume*

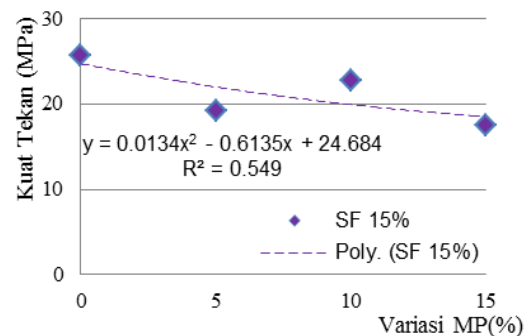
10,00% dengan kuat tekan 29,49 MPa ditunjukkan pada Gambar 14. Karena pertimbangan mengoptimalkan pemanfaatan limbah dan meminimalkan biaya pekerjaan beton maka penggunaan serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 6,22% menunjukkan sifat mekanik beton paling optimum dengan kuat tekan 29,04 MPa. Hasil analisis varian dua faktor menunjukkan serbuk marmer dan *silica fume*



Gambar 13. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi MP dengan SF 5,00%



Gambar 14. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi MP dengan SF 10,00%



Gambar 15. Hubungan Kuat Tekan dan Variasi MP dengan SF 15,00%

berpengaruh secara langsung terhadap kuat tekan beton. Hal ini dapat dilihat dari nilai $F_{hitung} = 4,86$ lebih besar dari $F_{tabel} = 3,20$ dan nilai $Sig. = 0,00$ lebih kecil dari 0,05.

Perbandingan kuat tekan hasil eksperimen dengan kuat tekan karakteristik beton ($f'c_k$) ditunjukkan Tabel 11. Tabel 11 menunjukkan adanya perbedaan antara hasil eksperimen dan kuat tekan karakteristik beton yang dihitung secara teoritis dengan menggunakan statistik. Perhitungan teoritis kuat tekan karakteristik diperoleh kuat tekan beton normal tanpa bahan tambahan serbuk marmer dan *silica fume* 17,87 MPa lebih rendah dari pada hasil eksperimen 22,36 MPa. Kuat tekan karakteristik optimum diperoleh dengan penggunaan serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 10,00% 25,64 MPa, dan kuat tekan terendah 15,29 MPa pada beton dengan campuran serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 15,00%. Pada perhitungan kuat tekan karakteristik terdapat empat kelompok campuran yang tidak memenuhi persyaratan karena kuat tekannya lebih rendah dari 20,00 MPa.

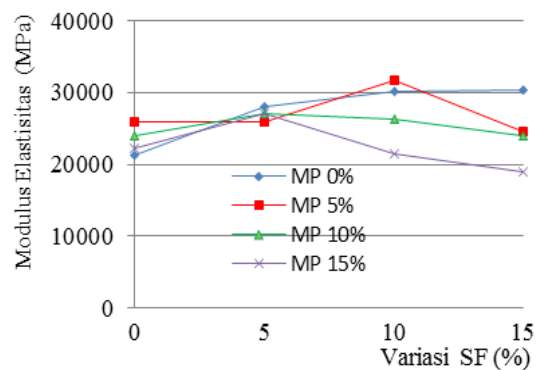
Tabel 11. Perbandingan Hasil Eksperimen dan Kuat Tekan Karakteristik Beton

Kode Benda Uji	MP (%)	SF (%)	f'c Rerata (MPa)	f'c _k (MPa)
I A	-	-	22,36	17,87
I B	-	5,00	26,21	24,81
I C	-	10,00	28,40	24,73
I D	-	15,00	25,63	21,00
II A	5,00	-	25,31	22,29
II B	5,00	5,00	26,38	23,64
II C	5,00	10,00	29,84	25,64
II D	5,00	15,00	19,12	17,57
III A	10,00	-	23,25	20,06
III B	10,00	5,00	27,27	24,46
III C	10,00	10,00	25,84	23,83
III D	10,00	15,00	22,72	20,48
IV A	15,00	-	21,76	20,79
IV B	15,00	5,00	26,95	21,92
IV C	15,00	10,00	19,82	15,95
IV D	15,00	15,00	17,55	15,29

Pengaruh modulus elastisitas paling besar ditunjukkan oleh beton dengan variasi serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 10,00% sebesar 31695 MPa. Campuran serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 15,00% memberikan nilai modulus elastisitas terkecil sebesar 18978 MPa. Penggunaan serbuk marmer 5,00; 10,00; dan 15,00% tanpa *silica fume* menunjukkan peningkatan terhadap modulus elastisitas beton. Penggunaan *silica fume* 5,00; 10,00; dan 15,00% tanpa serbuk marmer juga menunjukkan peningkatan terhadap modulus elastisitas beton. Hasil pengujian modulus elastisitas beton selengkap-

Tabel 12. Hasil Pengujian Modulus Elastisitas (E)

Kode Benda Uji	FAS	SP (%)	MP (%)	SF (%)	E Rerata (MPa)
I A	0,50	-	-	-	21331
I B	0,50	0,50	-	5,00	28090
I C	0,50	0,50	-	10,00	30084
I D	0,50	0,50	-	15,00	30359
II A	0,50	0,50	5,00	-	25821
II B	0,50	0,50	5,00	5,00	25815
II C	0,50	0,50	5,00	10,00	31695
II D	0,50	0,50	5,00	15,00	24518
III A	0,50	0,50	10,00	-	24036
III B	0,50	0,50	10,00	5,00	27112
III C	0,50	0,50	10,00	10,00	26335
III D	0,50	0,50	10,00	15,00	23989
IV A	0,50	0,50	15,00	-	22266
IV B	0,50	0,50	15,00	5,00	26975
IV C	0,50	0,50	15,00	10,00	21477
IV D	0,50	0,50	15,00	15,00	18978



Gambar 16. Hasil Pengujian Modulus Elastisitas (E)

nya ditunjukkan pada Tabel 12.

Peningkatan modulus elastisitas dikarenakan serbuk marmer dan *silica fume* mempunyai butiran yang halus sehingga dapat mengisi ruang antara agregat dan menjadikan beton lebih kohesif. Hasil pengujian modulus elastisitas beton dapat dilihat pada Gambar 16.

Hasil analisis varian dua faktor menunjukkan serbuk marmer dan *silica fume* berpengaruh secara langsung terhadap modulus elastisitas beton. Dapat dilihat dari nilai $F_{hitung} = 4,87$ lebih besar dari $F_{tabel} = 3,20$ dan nilai $Sig. = 0,00$ lebih kecil dari $0,05$. Hasil perbandingan modulus elastisitas beton hasil eksperimen dan perhitungan modulus elastisitas dengan pendekatan $E = 4700 \cdot \sqrt{f'c}$ ditunjukkan Tabel 13.

Tabel 13. Perbandingan Modulus Elastisitas Hasil Eksperimen dan Pendekatan Teoritis

Kode Benda Uji	MP (%)	SF (%)	E_{rerata} (MPa)	E (MPa)
I A	-	-	21331	22198
I B	-	5,00	28090	24062
I C	-	10,00	30084	25035
I D	-	15,00	30359	23769
II A	5,00	-	25821	23634
II B	5,00	5,00	25815	24134
II C	5,00	10,00	31695	25658
II D	5,00	15,00	24518	20546
III A	10,00	-	24036	22649
III B	10,00	5,00	27112	24536
III C	10,00	10,00	26335	23885
III D	10,00	15,00	23989	22397
IV A	15,00	-	22266	21923
IV B	15,00	5,00	26975	24732
IV C	15,00	10,00	21477	20898
IV D	15,00	15,00	18978	19680

Pada beton normal modulus elastisitas hasil eksperimen 21331 MPa lebih rendah dibandingkan dengan modulus elastisitas dengan pendekatan teoritis 22198 MPa. Untuk beton dengan penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* hasil eksperimen menunjukkan modulus

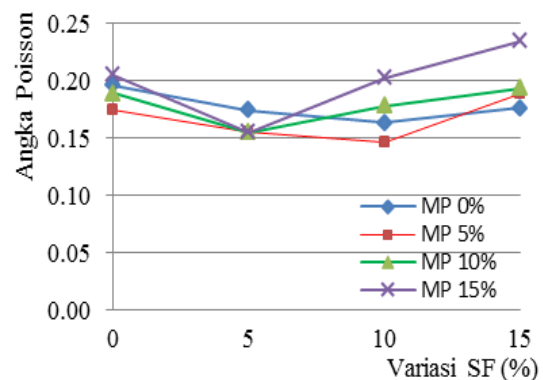
elastisitas yang lebih tinggi dari pada hasil perhitungan dengan pendekatan teoritis.

Perbedaan hasil pengujian dan pendekatan teoritis disebabkan karena rumus secara teoritis berlaku untuk modulus elastisitas beton dengan campuran normal tanpa penggunaan bahan tambahan. Penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* yang memiliki butiran halus membuat beton padat sehingga modulus elastisitas bahan meningkat.

Pengaruh Angka Poisson untuk campuran beton normal tanpa penggunaan serbuk marmer dan *silica fume* 0,20. Variasi serbuk marmer 5,00% dan *silica*

Tabel 14. Hasil Pengujian Angka Poisson

Kode Benda Uji	FAS	SP (%)	MP (%)	SF (%)	μ
I A	0,50	-	-	-	0,20
I B	0,50	0,50	-	5,00	0,17
I C	0,50	0,50	-	10,00	0,16
I D	0,50	0,50	-	15,00	0,18
II A	0,50	0,50	5,00	-	0,18
II B	0,50	0,50	5,00	5,00	0,16
II C	0,50	0,50	5,00	10,00	0,15
II D	0,50	0,50	5,00	15,00	0,19
III A	0,50	0,50	10,00	-	0,19
III B	0,50	0,50	10,00	5,00	0,16
III C	0,50	0,50	10,00	10,00	0,18
III D	0,50	0,50	10,00	15,00	0,19
IV A	0,50	0,50	15,00	-	0,21
IV B	0,50	0,50	15,00	5,00	0,16
IV C	0,50	0,50	15,00	10,00	0,20
IV D	0,50	0,50	15,00	15,00	0,24



Gambar 17. Hasil Pengujian Angka Poisson

fume 10,00% memberi hasil angka Poisson 0,15. Campuran dengan serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 15,00% memberikan hasil angka Poisson paling besar yaitu 0,24. Hasil pengujian angka Poisson (μ) beton ditunjukkan pada Tabel 14.

Penggunaan serbuk marmer tanpa *silica fume* juga menunjukkan pengaruh terhadap angka Poisson. Hasil pengujian angka Poisson dapat dilihat Gambar 17.

Hasil analisis varian dua faktor menunjukkan serbuk marmer dan *silica fume* berpengaruh secara langsung terhadap angka Poisson. Dapat dilihat dari nilai $F_{hitung} = 5,80$ lebih besar dari $F_{tabel} = 3,20$ dan nilai $Sig. = 0,00$ lebih kecil dari 0,05.

PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis terhadap komposisi kimia serbuk marmer, jika dibandingkan dengan komposisi kimia semen portland pozzolan (PPC) terdapat perbedaan yang signifikan. Di mana Kalsium Oksida (CaO) dan Silikon Dioksida (SiO₂) pada semen PPC masing-masing sebesar 58,66 dan 23,13% sedangkan pada serbuk marmer kandungan CaO sebesar 1,53% dan SiO₂ sebesar 17,63%. Selain itu serbuk marmer yang berasal dari batu marmer tergolong batuan alam yang mempunyai kandungan Oksigen (O₂) cukup besar $\pm 49,00\%$ sehingga kehilangan pijar pada serbuk marmer cukup besar. Menurut Mohamadien (2012), hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan kehilangan pijar (LOI) pada serbuk marmer sebesar 34,50%, jauh melampaui persyaratan kehilangan pijar pada PPC berdasarkan ASTM 595 (ASTM, 2007) sebesar 3,00%.

Berdasarkan analisis fisika dan kimia maka serbuk marmer lebih tepat digunakan sebagai bahan pengisi atau *filler* dari pada sebagai pengganti semen. Penggunaan serbuk marmer pada beton

memberikan keuntungan karena butiran-nya yang halus dapat mengisi ruang antar agregat dan menjadikan beton semakin kohesif dan meningkatkan kerapatan beton. Penggunaan serbuk marmer pada beton memberikan keuntungan ganda selain mengurangi dampak limbah terhadap lingkungan juga menghasilkan beton dengan sifat mekanik yang lebih baik.

Sifat mekanik beton yang menguntungkan ditandai dengan kuat tekan tinggi, modulus elastisitas besar dan angka Poisson kecil. Hasil pengujian menunjukkan hasil optimum diperoleh pada campuran dengan penggunaan serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 6,22%. Penggunaan serbuk marmer tanpa *silica fume* juga menunjukkan pengaruh terhadap sifat mekanik beton. Campuran serbuk marmer 6,62% dan *silica fume* 0,00% menunjukkan hasil yang optimum, penggunaan serbuk marmer 10,00% dan *silica fume* 0,00% terjadi peningkatan terhadap sifat mekanik beton namun peningkatan yang terjadi tidak signifikan. Penggunaan serbuk marmer 15,00% dan *silica fume* 0,00% menunjukkan penurunan yang kuat tekan yang relatif kecil. Hasil ini sama halnya dengan penelitian yang dilakukan oleh Corinaldesi, dkk. (2005) dan Shirule, dkk. (2012).

SIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis fisika dan kimia dapat disimpulkan bahwa serbuk marmer lebih tepat digunakan sebagai bahan pengisi atau *filler* dari pada sebagai pengganti semen. Penggunaan serbuk marmer tanpa *silica fume* menunjukkan hasil optimum pada persentase 6,62%. Serbuk marmer dan *silica fume* mempunyai pengaruh yang baik terhadap sifat mekanik beton. Penggunaan serbuk marmer 5,00% dan *silica fume* 6,22% menghasilkan beton dengan sifat mekanik optimum.

Selanjutnya disarankan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui komposisi kimia serbuk marmer dengan metode yang berbeda untuk mengetahui komposisi kimia secara keseluruhan. Penggunaan serbuk marmer sebagai agregat halus beton perlu diteliti untuk mengoptimalkan pemanfaatan limbah serbuk marmer.

DAFTAR RUJUKAN

- ASTM. 2007. *Annual Book of ASTM Standards Vol 04.02 Concrete and Agregates*.
- BASF. 2012. *Safety Data Sheet Master-Life SF 100 also Rheomac SF 100*. Jakarta: PT. BASF.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G., & Naik, R.T. 2005. *Characterization of Marble Powder for its Use in Mortar and Concrete*. Symposium on Sustainable Development of Cement and Concrete, Toronto, October 5–7.
- Herman, D.Z. 2005. *Kegiatan Pemantauan dan Evaluasi Konservasi Sumber Daya Mineral di Daerah Kabupaten Tulungagung provinsi Jawa Timur*. (Online), (<http://psdg.bgl.esdm.go.id/koloki/Konservasi/60.%20konservasi%20%20Tulung%20Agung,%20Jatim.pdf>, diakses 2 Desember 2013).
- Mohamadien, H.A. 2012. The Effect of Marble Powder and Silica Fume as Partial Replacement for Cement on Mortar. *J. Civil and Structural Engineering*, 3(2): 418-428.
- Semen Gresik. 2013. *Komposisi kimia dan Pengujian Fisika PPC Tipe IP-U*, (Online), (<http://semen.layanan-pelanggan/komposisipengujian.php>, diakses 7 Desember 2013).
- Shirule, P.A., Rahman, A., & Gupta, D.R. 2012. Partial Replacement of Cement with Marble Dust Powder. *J. Advance Engineering Research and Studies*, I(III): 175–177.
- Sika. 2010. *Technical Data Sheet for Sikament[®]LN*. Jakarta: PT. Sika Indonesia.
- SNI 03–2834–2000. 2000. *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 03–2847–2002. 2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 1972–2008. 2008. *Cara Uji Slump Beton*. Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.