

## PEMANFAATAN SERBUK KACA SEBAGAI *POWDER*

### PADA *SELF-COMPACTING CONCRETE*

Bernardinus Herbudiman<sup>1</sup>; Chandra Januar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dosen dan Peneliti Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung

<sup>2</sup> Alumni Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Nasional, Bandung

#### ABSTRAK

Limbah kaca dalam jumlah besar yang berasal dari industri maupun rumah tangga merupakan sumber masalah lingkungan. Masalah lingkungan juga disebabkan oleh emisi CO<sub>2</sub> dari industri semen. Salah satu usaha untuk mengatasi masalah tersebut adalah memanfaatkan limbah serbuk kaca sebagai *powder* dan sekaligus mereduksi penggunaan semen pada beton *self-compacting*. Beton ini memiliki kemampuan mengalir, mengisi ruang, dan melewati halangan kerapatan tulangan. Serbuk kaca diharapkan berfungsi sebagai *filler* dan *binder* karena memiliki potensi sebagai material pozzolan. Metoda SNI yang dikombinasikan dengan metoda *Simple Mix Design* Okamura digunakan untuk merancang komposisi campuran beton *self compacting*. Untuk merancang beton *self compacting*, parameter yang ditetapkan adalah jumlah agregat kasar sebesar 45% volume solid, *water-per-powder ratio* 0,40, dan kadar superplasticizer 1,5%. Parameter yang divariasikan sebagai berikut 1) kadar serbuk kaca 0%, 10%, 20%, 30% dari berat *powder*-nya; 2) ukuran serbuk kaca adalah lolos no.50 tertahan no.100, lolos no.100 tertahan no.200, lolos no 200 serta gabungan dari ketiga ukuran kaca tersebut; 3) pemakaian kadar air bebas sebesar 190 l/m<sup>3</sup>, 200 l/m<sup>3</sup>, dan 210 l/m<sup>3</sup>; serta 4) kadar silica fume 0%, 5% dan 10% dari berat *powder*-nya. Benda uji yang digunakan pada penelitian ini adalah silinder 10x20cm. Pengujian beton segar yang dilakukan adalah pengujian *slump flow*. Pada beton keras dilakukan pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah pada benda uji silinder. *Flowability* tertinggi dengan diameter sebaran beton segar sebesar 63 cm dicapai oleh beton dengan komposisi kadar serbuk kaca 10%, kadar air 210 l/m<sup>3</sup>, tanpa *silica fume*. Beton dengan kuat tekan tertinggi 51,72 MPa dicapai oleh beton dengan komposisi kadar serbuk kaca 10% gradasi menerus, kadar semen 403 kg/m<sup>3</sup>, kadar air 190 l/m<sup>3</sup>, dan kadar *silica fume* 5%. Substitusi serbuk kaca terhadap semen hingga 30% masih menghasilkan beton struktural hingga 32,23 MPa. Serbuk kaca dengan gradasi menerus menghasilkan kekuatan yang relatif lebih tinggi dibandingkan serbuk kaca dengan gradasi seragam.

**Kata kunci :** serbuk kaca, *slump flow*, *self-compacting concrete*

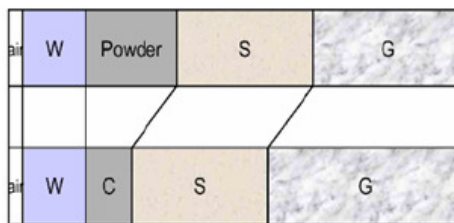
#### 1. Pendahuluan

Limbah kaca dalam jumlah besar yang berasal dari industri maupun rumah tangga merupakan sumber masalah lingkungan. Pemanfaatan limbah kaca untuk digunakan kembali (*re-use*) merupakan salah satu solusi penanganan limbah yang tepat. Masalah lingkungan juga dijumpai pada industri semen. Proses produksi bahan baku semen menjadi semen membutuhkan pembakaran batu bara yang menghasilkan emisi gas karbondioksida dalam jumlah yang relatif besar bagi peningkatan pemanasan global. Untuk mengurangi dampak tersebut, para peneliti telah berusaha melakukan substitusi parsial semen dengan bahan pozzolan atau dengan bahan bersifat semen lainnya, tanpa mengurangi secara signifikan kualitas beton yang dihasilkan. Salah satu usaha untuk mengatasi masalah tersebut adalah memanfaatkan limbah serbuk kaca sebagai *powder* dan sekaligus mereduksi penggunaan semen pada beton *self-compacting*. Serbuk kaca diharapkan berfungsi sebagai *filler* dan *binder* karena memiliki potensi sebagai material pozzolan.

Beton *self compacting* (*self-compacting concrete*, SCC) merupakan salah satu bentuk campuran beton yang memiliki volume pori-pori yang kecil di dalam beton sehingga meminimalkan adanya udara yang terjebak di dalam beton segar. Berdasarkan namanya, SCC dapat didefinisikan sebagai campuran beton yang memiliki karakteristik dapat memadat dengan sendirinya tanpa menggunakan bantuan alat pemadat (*vibrator*). Beton *self-compacting* memiliki kemampuan mengalir, mengisi ruang, dan melewati halangan kerapatan tulangan tanpa terjadi segregasi. Beberapa keunggulan yang dimiliki oleh SCC adalah menghilangkan masalah yang terkait dengan getaran, dapat meminimalisir tenaga kerja yang terkait, pelaksanaan konstruksi menjadi lebih cepat, peningkatan mutu dan daya tahan, serta kekuatan yang lebih tinggi (*high performance*).

## 2. Beton self-compacting

Beton *self-compacting* dapat dihasilkan dengan cara: 1) menggunakan agregat kasar sebesar 50% volume solid, agar mortar dapat melewati sela-sela dari agregat kasar yang kurang rapat tersebut; 2) volume agregat halus ditetapkan hanya 40% dari total volume mortar, yang bertujuan mengisi *void* dari agregat kasar; 3) rasio volume air/*powder* yang rendah; dan 4) dosis *superplasticizer* yang tinggi (Okamura, 1993).



Keterangan: W: air, C: semen, S: agregat halus, G: agregat kasar

**Gambar 1. Komposisi beton self-compacting** (Nugraha, P., Antoni, 2007)

Proporsi agregat kasar pada beton *self-compacting* lebih sedikit dibandingkan dengan beton konvensional, seperti tampak pada Gambar 1 (Nugraha, P., Antoni, 2007). Peran semen dalam beton konvensional digantikan oleh *powder*. Pada awal perkembangan beton *self-compacting*, *powder* terdiri atas campuran semen, *silica fume*, dan *fly ash*. Pada penelitian ini, *fly ash* digantikan dengan limbah serbuk kaca hijau dengan pertimbangan potensi serbuk kaca yang dapat berfungsi sebagai material pozzolan yang dapat berfungsi sebagai *binder* sekaligus sebagai *filler*. Untuk mendapatkan komposisi yang lebih ekonomis, jumlah kandungan *silica fume* juga dicoba dibatasi pada kadar sangat rendah, bahkan hingga tanpa menggunakan *silica fume*. Proporsi air dan pasir, baik SCC maupun beton konvensional memiliki proporsi yang relatif sama.

*Mix design* SCC harus memenuhi tiga syarat utama: 1) kemampuan untuk mengalir (*flowability*); 2) kemampuan untuk melewati (*passingability*); dan 3) kemampuan pencegahan segregasi agregat (*segregation resistance*) (Okamura, 2003). *Mix design* SCC dirancang dan diuji untuk memenuhi kebutuhan proyek. Kemampuannya yang dapat mengalir membuat beton jenis ini dapat dipompa dan dialirkan melalui pipa. Hal ini sangat membantu sekali dalam pekerjaan di proyek terutama ketika hendak mengerjakan struktur dengan elevasi yang tinggi. Selain itu, pencegahan segregasi agregat membuat SCC lebih unggul karena dengan tinggi jatuh yang relatif tinggi, beton jenis ini tidak mengalami segregasi.

Evaluasi SCC dapat dilakukan dengan menguji beberapa parameter seperti tampak pada Tabel 1. Parameter uji dan metoda untuk evaluasi SCC yang mengacu pada *The European Guidelines for Self Compacting Concrete* (2005) dapat dilihat pada Tabel 2. Pengujian SCC yang penting dan yang paling dikembangkan adalah pengujian *slump flow*, dikarenakan kondisi *workability* beton dapat terlihat dari sebaran beton segarnya. Selain itu, pengaplikasian di lapangan lebih mudah jika dibandingkan dengan pengujian yang lain (Ardiansyah, 2010).

**Tabel 1. Parameter uji dan metoda untuk evaluasi SCC**

Parameter yang diuji	Alat uji	Parameter yang diukur
<i>Flowability/Fillingability</i>	<i>Slump-Flow</i>	<i>Total Spread</i>
	<i>Kajima Box</i>	<i>Visual Filling</i>
<i>Viscosity/Flowability</i>	<i>V-funnel</i>	<i>flow time</i>
	<i>O-funnel</i>	<i>flow time</i>
	<i>Orimet</i>	<i>flow time</i>
<i>Passingability</i>	<i>L – box</i>	<i>passing ratio</i>
	<i>U-box</i>	<i>height difference</i>
	<i>J-ring</i>	<i>step height, total flow</i>
	<i>Kajima Box</i>	<i>visual passing ability</i>
<i>Segregation Resistance</i>	<i>Penetration</i>	<i>Depth</i>
	<i>Sleve segregation</i>	<i>percent laitance</i>
	<i>Settlement Column</i>	<i>segregation ratio</i>

**Tabel 2. Parameter uji dan metoda untuk evaluasi SCC**

No.	Pengujian SCC	Range
1	Diameter <i>Slump Flow</i>	min. 500 mm
2	<i>V- Funnel</i>	8-15 detik
3	<i>L- Shaped Box (H2/H1)</i>	> 0.8
4	<i>w/p ratio</i>	0.25 - 0.40
5	Kuat Tekan Umur 28 Hari	min. 40 MPa
6	Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari	min. 2.4 MPa

Selain memiliki fungsi dan keunggulan, penggunaan serbuk kaca pada beton juga memiliki kelemahan yang perlu mendapat perhatian. Unsur pokok dari kaca adalah silika (Setiawan, 2006). Terdapat indikasi bahwa terjadi pengembangan (*expansion*) pada volume beton, meskipun menggunakan *low alkali cement*. Salah satu dampak dari penggunaan agregat kaca pada beton adalah terjadinya *alkali silica reaction* (ASR) antara pasta semen dan agregat kaca. ASR adalah reaksi yang terjadi antara ion hidroksil dalam air pori beton dengan silika yang mungkin terdapat dalam beberapa agregat (Byars, et al, 2004). Produk dari reaksi ini adalah gel yang akan menyerap air atau menyebabkan pengembangan beton. Jika hal ini terjadi, tekanan yang dihasilkan akan menyebabkan *microcracking*, pengembangan, dan pada akhirnya menimbulkan penurunan kekuatan beton setelah jangka waktu yang lama.

### 3. Metodologi

Agregat halus dan kasar yang digunakan terlebih dahulu diuji karakteristiknya. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus adalah sebagai berikut: kadar air 10,13%; absorpsi 4,93%; berat volume gembur 1,47 gr/cm<sup>3</sup>; berat volume padat 1,49 gr/cm<sup>3</sup>; *bulk specific-gravity* kondisi SSD 2,57; kadar lumpur 2,92%; dan modulus kehalusan 2,47. Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar adalah sebagai berikut: kadar air 2,77%; absorpsi 3,11%; berat volume gembur 1,34 gr/cm<sup>3</sup>; berat volume padat 1,44 gr/cm<sup>3</sup>; *bulk specific-gravity* kondisi SSD 2,58; ukuran maksimum 20 mm; dan modulus kehalusan 7,23.

Dari perhitungan komposisi yang mengacu pada Standar Nasional Indonesia (SNI 03-2834-2000) untuk kuat tekan rencana sebesar 40 MPa diperoleh nilai *water/cement ratio* 0,4, dengan kadar air bebas 190 kg/m<sup>3</sup>, dan kadar semen 475 kg/m<sup>3</sup>. Selanjutnya komposisi awal ini akan dimodifikasi dengan *simple mix design* Okamura dengan jumlah agregat kasar sebesar 45% dari volume solid (berat isi padat).

Data berat isi dan berat jenis penyusun beton adalah sebagai berikut: berat isi agregat kasar = 1444,444 kg/m<sup>3</sup>, berat jenis agregat kasar 2578 kg/m<sup>3</sup>, berat jenis agregat halus 2570 kg/m<sup>3</sup>, berat jenis semen 3150 kg/m<sup>3</sup>, berat jenis air 1000 kg/m<sup>3</sup>, berat jenis kaca hijau 2400 kg/m<sup>3</sup> (Hafizi, 2009), berat jenis *superplasticizer* 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Dari data tersebut, selanjutnya dapat dihitung berat dari penyusun beton. Berat agregat kasar lebih dahulu ditetapkan sebesar 45% dari berat isinya. Selanjutnya volume agregat halus dihitung dengan cara mengurangi volume total dengan volume bahan penyusun selain agregat halus (berat per berat-jenis masing-masing bahan penyusun). Berat agregat halus selanjutnya dapat dihitung dengan mengalikan volume agregat halus dengan berat jenisnya. Pada akhirnya, untuk substitusi parsial serbuk kaca sebesar 10%, maka berat penyusun beton adalah sebagai berikut: semen 427,5 kg/m<sup>3</sup>, serbuk kaca 47,5 kg/m<sup>3</sup>, *superplasticizer* 7,125 kg/m<sup>3</sup>, air 190 kg/m<sup>3</sup>, agregat halus 964,106 kg/m<sup>3</sup>, dan agregat kasar 650,25 kg/m<sup>3</sup>.

Trial mix dirancang dengan parameter tetap yaitu kuat tekan rencana 40 MPa, rasio *water/powder* 0,4, dan kadar *superplasticizer* Sika Viscocrete-10 sebesar 1,5% dari berat *powder*. Trial mix selanjutnya dirancang dengan beberapa variasi berikut, yang juga ditunjukkan komposisinya pada Tabel 3:

1. Substitusi parsial serbuk kaca sebesar 0%, 10%, 20% dan 30% sebagai pengganti semen (Tabel 3: V1, V2, V3, V4).
2. Jumlah kadar air bebas sebesar 190, 200, dan 210 l/m<sup>3</sup> (Tabel 3: V2, V5, V6).
3. Ukuran serbuk kaca yaitu a) lolos saringan No.200, b) lolos saringan No.100 tertahan saringan No.200, c) lolos saringan No.50 tertahan saringan No.100, dan d) gabungan dari ukuran a, b, dan c dengan masing-masing sepertiga bagian (Tabel 3: V7, V8, V9, V2).
4. Substitusi parsial *silica fume* sebesar 0%, 5%, dan 10% sebagai pengganti semen (Tabel 3: V2, V10, V11).

**Tabel 3. Trial mix komposisi campuran beton SCC**

No.	Mix	Semen (kg/m <sup>3</sup> )	Serbuk Kaca (kg/m <sup>3</sup> )	Silica fume (kg/m <sup>3</sup> )	Agregat Kasar (kg/m <sup>3</sup> )	Agregat Halus (kg/m <sup>3</sup> )	Air (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Superplasticizer</i> (kg/m <sup>3</sup> )	w/p ratio (kg/m <sup>3</sup> )
1.	V 1	475.00	0	0	650.25	976.217	190	7.125	0.40
2.	V 2	427.50	47.50	0	650.25	964.106	190	7.125	0.40
3.	V 3	380.00	95.00	0	650.25	951.996	190	7.125	0.40
4.	V 4	332.50	142.50	0	650.25	939.885	190	7.125	0.40
5.	V 5	450.00	50.00	0	650.25	934.765	200	7.500	0.40
6.	V 6	472.50	52.50	0	650.25	868.710	210	7.875	0.40
7.	V 7	427.50	47.50	0	650.25	964.106	190	7,125	0.40
8.	V 8	427.50	47.50	0	650.25	964.106	190	7,125	0.40
9.	V 9	427.50	47.50	0	650.25	964.106	190	7,125	0.40
10.	V 10	403.75	47.50	23.75	650.25	983.438	190	7,125	0.40
11.	V 11	380.00	47.50	47.50	650.25	1002.86	190	7,125	0.40

Pengujian beton segar dilakukan dengan pengujian *slump flow* untuk mendapatkan diameter sebaran maksimum beton segar. Semakin besar sebaran menunjukkan tingkat flowabilitas yang semakin tinggi. Diameter sebaran beton segar yang dihasilkan dari pengujian *slump flow* ditunjukkan oleh Gambar 2. Setelah pengujian ini, beton segar dicetak dengan cetakan silinder berukuran diameter 100 mm dan tinggi 200 mm dengan jumlah enam silinder per variasi *trial mix*. Pada umur 1 hari, beton dibuka dari cetakan dan direndam hingga diuji pada umur 28 hari, seperti tampak pada Gambar 3. Pengujian beton keras yang dilakukan adalah pengujian kuat tekan dan tarik belah seperti ditunjukkan pada Gambar 4 dan Gambar 5.





Gambar 2. Diameter sebaran beton segar



Gambar 3. Perawatan beton



Gambar 4. Pengujian kuat tekan beton



Gambar 5. Pengujian kuat tarik belah beton

#### 4. Hasil Pengujian dan Pembahasan

Diameter sebaran beton segar hasil uji slump flow, kuat tekan rata-rata, dan kuat tarik belah rata-rata dari 11 variasi *trial mix* ditunjukkan pada Tabel 4. Persentase kadar kaca dan persentase kadar *silica fume* yang ditunjukkan oleh Tabel 4 merupakan persentase kadar substitusi parsial semen terhadap total *powder*.

Tabel 5 menunjukkan pengaruh substitusi parsial serbuk kaca sebesar 0%, 10%, 20% dan 30% sebagai pengganti semen terhadap *slump flow*, kuat tekan dan kuat tarik belah.

Tabel 6 menunjukkan pengaruh jumlah kadar air bebas sebesar 190, 200, dan 210 l/m<sup>3</sup> terhadap flowabilitas dan kekuatan beton.

Tabel 7 menunjukkan pengaruh ukuran serbuk kaca yaitu a) lolos saringan No.200, b) lolos saringan No.100 tertahan saringan No.200, c) lolos saringan No.50 tertahan saringan No.100, dan d) gabungan dari ukuran a, b, dan c dengan masing-masing sepertiga bagian terhadap sifat mekanis beton.

Tabel 8 menunjukkan pengaruh kadar substitusi parsial *silica fume* sebesar 0%, 5%, dan 10%, terhadap kekuatan beton.

**Tabel 4. Hasil pengujian**

<i>Trial Mix Design</i>	Kadar Kaca	Ukuran Kaca	Kadar Air	Kadar Silica Fume	Slump Spread (cm)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Kuat Tarik Belah Beton (MPa)
I	0 %	-	190	0%	60	48,92	3,89
II	10 %	Gabungan	190	0%	50	49,08	4,08
III	20 %	Gabungan	190	0%	32	41,75	3,21
IV	30 %	Gabungan	190	0%	30	32,23	2,75
V	10 %	Gabungan	200	0%	54	47,09	3,58
VI	10 %	Gabungan	210	0%	63	41,87	3,44
VII	10 %	L 200	190	0%	54	45,99	3,26
VIII	10 %	L 100, T 200	190	0%	50	45,405	3,30
IX	10 %	L 50, T 100	190	0%	42	46,015	3,37
X	10 %	Gabungan	190	5%	42	51,72	4,36
XI	10 %	Gabungan	190	10%	30	47,57	4,05

**Tabel 5. Pengaruh substitusi parsial serbuk kaca terhadap slump flow, kuat tekan dan kuat tarik belah**

<i>Trial Mix Design</i>	Kadar Kaca	Slump Spread (cm)	Kuat Tekan Beton (MPa)	Peningkatan /Penurunan Kuat Tekan	Kuat Tarik Belah Beton (MPa)	Peningkatan /Penurunan Kuat Tarik Belah
I	0 %	60	48,92	-	3,89	-
II	10 %	50	49,08	+ 0,33%	4,08	+ 4,88%
III	20 %	32	41,75	- 14,66%	3,21	- 17,48%
IV	30 %	30	32,23	- 34,12%	2,75	- 29,31%

Dari Tabel 5 tampak bahwa untuk mencapai nilai slump flow untuk beton *self compacting* (SCC) sebesar 50 cm, kadar substitusi parsial serbuk kaca maksimum yang bisa dilakukan adalah 10% dari berat *powder*. Penambahan kadar serbuk kaca hingga 20% akan mereduksi flowabilitas dan penambahan kadar hingga 30% dapat menghilangkan sifat SCC.

Kadar optimum substitusi parsial serbuk kaca adalah 10% pada campuran dengan rasio w/p 0,4, dosis superplasticizer 1,5%, dan proporsi agregat kasar 45%. Komposisi tersebut menghasilkan nilai kuat tekan rata-rata 49,08 MPa dan kuat tarik belah rata-rata 4,08 MPa, sehingga meningkatkan kuat tekan dan tarik belah hingga +0,33% dan +4,88%. Penggunaan substitusi parsial serbuk kaca hingga 20% masih menghasilkan beton diatas kuat tekan rencana 40 MPa. Pada substitusi parsial serbuk kaca hingga 30%, beton struktural masih dapat dihasilkan dengan kuat tekan 32,23 MPa.

**Tabel 6. Pengaruh jumlah kadar air bebas terhadap flowabilitas dan kekuatan beton**

<i>Trial Mix Design</i>	<b>Kadar Air</b> (l/m <sup>3</sup> )	<i>Slump Spread</i> (cm)	<b>Peningkatan Slump Spread</b>	<b>Kuat Tekan Beton (MPa)</b>	<b>Penurunan Kuat Tekan</b>	<b>Kuat Tarik Belah Beton (MPa)</b>	<b>Penurunan Kuat Tarik Belah</b>
II	190	50	-	49,08	-	4,08	-
V	200	54	+8%	47,09	-4,05%	3,58	-12,25%
VI	210	63	+26%	41,87	-14,69%	3,44	-15,69%

Penambahan kadar air bebas dapat meningkatkan flowabilitas namun dapat mengakibatkan terjadinya penurunan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton. Pada *trial mix design* dengan kadar air sebesar 200 l/m<sup>3</sup> dan 210 l/m<sup>3</sup>, flowabilitas meningkat secara signifikan +8% dan +26%, namun kuat tekan yang dihasilkan menurun -4,05% dan -14,69%, kuat tarik belah yang dihasilkan menurun -12,25% dan -15,69%.

**Tabel 7. Pengaruh ukuran serbuk kaca terhadap sifat mekanis beton**

<i>Trial Mix Design</i>	<b>Ukuran Kaca</b>	<i>Slump Spread</i> (cm)	<b>Kuat Tekan Beton (MPa)</b>	<b>Kuat Tarik Belah Beton (MPa)</b>
II	Gabungan	50	49,08	4,08
VII	L 200	54	45,99	3,26
VIII	L 100, T 200	50	45,405	3,30
IX	L 50, T 100	42	46,015	3,37

Perbedaan ukuran kaca yaitu a) lolos saringan No.200, b) lolos saringan No.100 tertahan saringan No.200, c) lolos saringan No.50 tertahan saringan No.100, menghasilkan nilai kekuatan beton pada *trial mix design* yang cenderung konstan. Komposisi serbuk kaca gabungan dari ketiga fraksi ukuran kaca mempunyai nilai kuat tekan dan kuat tarik belah paling tinggi, yaitu sebesar 49,08 MPa dan 4,08 MPa

**Tabel 8. Pengaruh kadar substitusi parsial silica fume terhadap kekuatan beton**

<i>Trial Mix Design</i>	<b>Kadar Silica Fume</b>	<i>Slump Spread</i> (cm)	<b>Kuat Tekan Beton (MPa)</b>	<b>Peningkatan /Penurunan Kuat Tekan</b>	<b>Kuat Tarik Belah Beton (MPa)</b>	<b>Peningkatan /Penurunan Kuat Tarik Belah</b>
II	0%	50	49,08	-	4,08	-
X	5%	42	51,72	+5,38%	4,36	+6,86%
XI	10%	30	47,57	-3,08%	4,05	-0,74%

Kadar *silica fume* 5% merupakan kadar yang optimum karena dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan tarik belah sebesar +5,38% dan +6,86% menjadi 51,72 MPa dan 4,36 MPa. Penggunaan *silica fume* 10% justru mengakibatkan reduksi *slump spread*, kuat tekan dan kuat tarik.

## 5. Kesimpulan

Untuk mencapai nilai slump flow untuk beton *self compacting* (SCC) sebesar 50 cm, kadar substitusi parsial serbuk kaca maksimum yang bisa dilakukan adalah 10% dari berat *powder*.

Kadar optimum substitusi parsial serbuk kaca adalah 10%. Komposisi tersebut menghasilkan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah rata-rata 49,08 MPa dan 4,08 MPa, yang menunjukkan peningkatan kekuatan sebesar +0,33% dan +4,88%. Kadar serbuk kaca hingga 20% masih menghasilkan beton diatas kuat tekan rencana 40 MPa. Pada kadar serbuk kaca hingga 30%, beton struktural masih dapat dihasilkan dengan kuat tekan 32,23 MPa.

Penambahan kadar air bebas dapat meningkatkan flowabilitas namun dapat mengakibatkan terjadinya penurunan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah beton. Pada *trial mix design* dengan kadar air sebesar 190 liter, 200 liter, dan 210 liter, kuat tekan dan kuat tarik belah yang dihasilkan masing-masing sebesar 49,08 MPa dan 4,08 MPa, 47,09 MPa dan 3,58 MPa, serta 41,87 MPa dan 3,44 MPa.

Perbedaan ukuran kaca yaitu a) lolos saringan No.200, b) lolos saringan No.100 tertahan saringan No.200, c) lolos saringan No.50 tertahan saringan No.100, menghasilkan nilai kekuatan beton pada *trial mix design* yang cenderung konstan dengan nilai kuat tekan dan kuat tarik belah masing-masing sebesar 45,99 MPa dan 3,26 MPa, 45,405 MPa dan 3,43 MPa, serta 46,015 MPa dan 3,37 MPa. Komposisi serbuk kaca gabungan mempunyai nilai kuat tekan dan kuat tarik belah paling tinggi, yaitu sebesar 49,08 MPa dan 4,08 MPa

Kadar *silica fume* 5% merupakan kadar yang optimum karena dapat meningkatkan nilai kuat tekan dan tarik belah sebesar +5,38% dan +6,86% menjadi 51,72 MPa dan 4,36 MPa.

## 6. Daftar Pustaka

- 1) Ardiansyah, R. (2010). Slump Flow Test. [ronymedia.wordpress.com/2010/08/02/slump-flow-test](http://ronymedia.wordpress.com/2010/08/02/slump-flow-test).
- 2) Byars, EA., Zhu, HY., dan Morales, B. (2004). Glassconcrete. [www.wrap.org.uk](http://www.wrap.org.uk).
- 3) Hafizi, A.M. (2009). Pemanfaatan Limbah Kaca sebagai Substitusi Agregat Halus pada Beton Ramah Lingkungan. Bandung. Skripsi Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional.
- 4) Nugraha, P. dan Antoni. (2007). Teknologi Beton dari Material, Pembuatan, ke Beton Kinerja Tinggi. Jakarta: Andi.
- 5) Okamura, H. and Ozawa, K. (1993). Self-Compactable High Performance Concrete. Detroit: American Concrete Institute.
- 6) Okamura, H. and Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Technology Vol 1, No 1, 5-15.
- 7) Setiawan, B. (2006). Pengaruh Penggunaan Agregat Kaca pada Beton Ditinjau dari Segi Kekuatan dan Shrinkage. Surabaya: Tugas Akhir Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Petra.
- 8) SNI 03-2834-2000. (2000) Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal.
- 9) The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. (2005).