



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERAN *PUMICE* DALAM PEMBUATAN *SELF-COMPACTING  
LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE***

**TESIS**

**MOCH. SYAIFUL ANWAR  
1006786631**

**FAKULTAS MATEMATIKA ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM PASCASARJANA ILMU MATERIAL  
JAKARTA  
JULI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**PERAN *PUMICE* DALAM PEMBUATAN *SELF-COMPACTING  
LIGHTWEIGHT AGGREGATE CONCRETE***

**TESIS**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
magister**

**MOCH. SYAIFUL ANWAR  
1006786631**

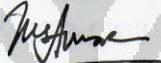
**FAKULTAS MATEMATIKA ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM PASCASARJANA ILMU MATERIAL  
JAKARTA  
JULI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : MOCH. SYAIFUL ANWAR**

**NPM : 1006786631**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 30 Juni 2012**



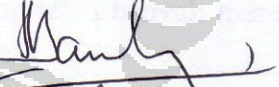
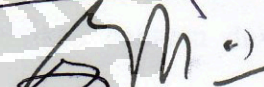
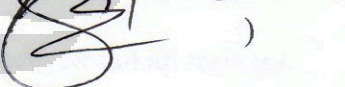
## HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Moch. Syaiful Anwar  
NPM : 1006786631  
Program Studi : Ilmu Material  
Judul Tesis : Peran *Pumice* dalam Pembuatan *Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete*

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar **Magister Science** pada Program Studi Ilmu Material, Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Azwar Manaf, M.Met (  )  
Pembimbing : Dr. Dra Vera Indrawati Judarta (  )  
Penguji : Dr. Bambang Soegijono (  )  
Penguji : Dr. Emil Budianto (  )  
Penguji : Dr. Suhardjo Poertadji (  )

Ditetapkan di : Jakarta .

Tanggal : 30 Juni 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Science Program Studi Ilmu Material pada Fakultas Matematika Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr. Azwar Manaf, selaku dosen pembimbing pertama yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Dr. Vera Indrawati Judarta, selaku dosen pembimbing kedua yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (3) Dr.-Ing. Andika Widya Pramono, selaku penasehat yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (4) pihak PT. Indocement Tunggul Prakarsa, Tbk yang telah banyak membantu dalam usaha memperoleh data yang saya perlukan;
- (5) orang tua dan keluarga saya yang telah memberikan bantuan dukungan material dan moral; dan
- (6) sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Jakarta, 30 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Moch. Syaiful Anwar

NPM : 1006786631

Program Studi : Ilmu Material

Fakultas : Matematika Ilmu Pengetahuan Alam

Jenis karya : Tesis

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Peran *Pumice* Dalam Pembuatan *Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete*

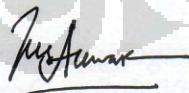
berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 30 Juni 2012

Yang menyatakan



(Moch. Syaiful Anwar)

## ABSTRAK

Nama : Moch. Syaiful Anwar  
Program Studi : Ilmu Material  
Judul : Peran *Pumice* Dalam Pembuatan *Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete*

Pada dasawarsa ini telah banyak dikembangkan *self-compacting lightweight aggregate concrete* (SCLWAC) yang diproduksi dengan menggunakan semen Tipe I (*Ordinary Portland Cement Type I*), namun relatif sedikit pengembangan SCLWAC yang diproduksi dengan menggunakan semen campuran seperti *Portland Cement Composite* (PCC). Tesis ini membahas peran *pumice* sebagai agregat ringan kasar dalam pembuatan SCLWAC dimana PCC sebagai matriksnya untuk mengurangi densitas beton tapi kekuatannya tinggi. Memperoleh *mix design*, sifat beton segar (*fresh concrete*) seperti *slump flow*, *T<sub>500</sub>*, *V-funnel test*, *Visual Stability Index-VSI*, dan sifat beton keras (*hardened concrete*) seperti kuat tekan (*compressive strength*), kuat belah (*splitting tensile strength*), modulus elastisitas umur 3, 7, 28 hari dan densitas umur 28 hari dari SCLWAC-*pumice* dan SCLWAC-*pumice*+mikrofiber *Poly Vinyl Alcohol* (PVA). Telah dilakukan *mix trial* dalam pembuatan SCLWAC-*pumice* sebanyak ±39 (tiga puluh sembilan). Dari tiga puluh sembilan *mix-trial* diambil 4 (empat) *mix-trial* yang memiliki sifat *self-compacting*, kemudian dari empat *mix-trial* (mix A, B, C, D) dipilih satu *mix-trial* yang memiliki sifat *self-compacting* dan kuat tekan pada umur 28 hari terbaik dibandingkan lainnya. *Mix-trial* yang terpilih dijadikan *mix design* pada tesis ini dan dilakukan uji sifat *self-compacting* kembali sebanyak 4 (empat) kali sebelum dibuat sampel beton kubus dan silinder. Selanjutnya, dilakukan uji kuat tekan (*compressive strength*), kuat belah (*splitting tensile strength*), modulus elastisitas yang mengacu ACI 318 dan pengamatan struktur mikro menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Hasilnya menunjukkan *lighweight aggregate pumice* telah berhasil dimanfaatkan dalam pembuatan SCLWAC yang memiliki propertis beton segar dan beton keras yang baik.

Kata kunci:

*Pumice, Self-compacting lighthweight aggregate concrete, Mix design, Fresh concrete, Hardened concrete, Mikrofiber Poly Vinyl Alcohol (PVA).*

## ABSTRACT

Name : Moch. Syaiful Anwar  
Study Program : Materials Science  
Title : The Role of Pumice in Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete Manufactured

In this decade development of self-compacting lightweight aggregate concrete (SCLWAC) are produced by using Type I cement (Ordinary Portland Cement Type I), but relatively less of SCLWAC produced by using a blended cement such as Portland Composite Cement (PCC). This thesis discusses the role of pumice as lightweight coarse aggregate in the manufacture SCLWAC in which PCC as a matrix to reduce concrete's density but its compressive strength is high. Obtain mix design, properties of fresh concrete such as slump flow, T500, V-funnel test, Visual Stability Index-VSI, and properties of the hardened concrete such as compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity in 3, 7, 28 days and density in 28 days on the SCLWAC-pumice and SCLWAC-pumice+microfiber PFA. Trial has been performed in the manufacture pumice-SCLWAC as much as  $\pm 39$  (thirty nine). From the thirty nine mix-trial taken 4 (four) mix-trial that have self-compacting properties, then from the four-trial mix (mix A, B, C, D) selected only one mix-trial that have the best self-compacting properties and compressive strength at 28 days than others. Selected Mix-trial are used as mix design in this thesis and self-compacting properties are retested as much as four times before the sample casted in cubes and cylinders mold. Furthermore, the sample tested compressive strength, splitting tensile strength, modulus of elasticity which refers to ACI 318 and the observation of the microstructure using SEM (Scanning Electron Microscope). The results show lightweight pumice aggregate has been successfully utilized in the manufacture of SCLWAC which has properties of fresh concrete and hardened concrete is good.

Key words:

Pumice, Self-compacting lightweight aggregate concrete, Mix design, Fresh concrete, Hardened concrete, Microfiber Poly Vinyl Alcohol (PVA).



## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	iv
ABSTRAK.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
<b>1. PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Penelitian .....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>2. TINJAUAN PUSTAKA .....</b>	<b>4</b>
2.1 Material Penyusun SCC .....	4
2.1.1 Semen .....	4
2.1.2 <i>Fly ash</i> .....	7
2.1.3 Agregat .....	10
2.1.4 <i>Chemical admixture</i> .....	13
2.1.5 <i>Mixing water</i> .....	16
2.2 Metode-Metode Proporsi Campuran SCC .....	16
2.3 <i>Fresh SCC Properties</i> .....	17
2.3.1 <i>Rheology</i> .....	17
2.3.2 <i>Slump flow test</i> (dengan $T_{500}$ dan <i>Visual Stability Index</i> ).....	18
2.3.3 <i>V-funnel test</i> .....	19
2.3.4 Kriteria <i>workability</i> untuk <i>fresh SCC</i> .....	20
2.4 <i>Hardened Concrete</i> .....	20
2.4.1 Kuat tekan ( <i>Compressive strength</i> ).....	20
2.4.2 Kuat belah ( <i>Splitting tensile strength</i> ) (ASTM C496) .....	24
2.4.3 Modulus elastisitas .....	24
<b>3. METODOLOGI PENELITIAN .....</b>	<b>26</b>
3.1 Material .....	27
3.2 Preparasi Material.....	27
3.3 Pemilihan Proporsi Campuran ( <i>mix design</i> ).....	29
3.4 Pengujian Beton .....	30
<b>4. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>31</b>
4.1 Pemilihan Material Lokal .....	31
4.2 Pemilihan <i>Mix Design</i> .....	33
4.3 Beton Segar SCLWAC ( <i>Fresh Concrete</i> ).....	37
4.4 Beton Keras SCLWAC ( <i>Hardened Concrete</i> ) .....	41
<b>5. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>53</b>
<b>DAFTAR REFERENSI .....</b>	<b>54</b>

## DAFTAR GAMBAR

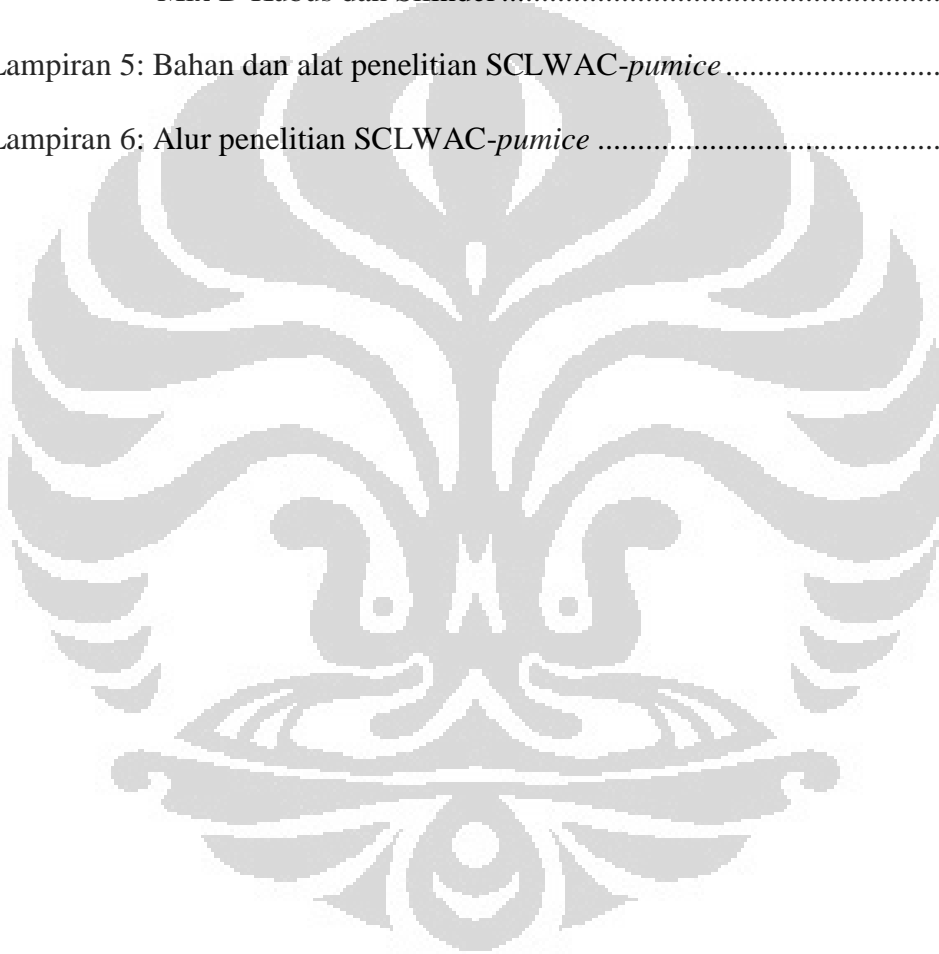
Gambar 2.1.	Komposisi kimia semen portland klinker.....	5
Gambar 2.2.	Partikel <i>fly ash spherical</i> .....	9
Gambar 2.3.	Kurva <i>flow</i> dari SCC pada fraksi volum sama tapi berbeda <i>filler</i> .....	10
Gambar 2.4.	SEM <i>pumice aggregate</i> .....	13
Gambar 2.5.	<i>Bingham fluid model</i> .....	18
Gambar 2.6.	<i>Visual stability index rating</i> .....	19
Gambar 2.7.	Alat uji <i>V-funnel test</i> .....	20
Gambar 2.8.	Pengaruh kondisi kelembaban dan waktu <i>curing</i> terhadap <i>compressive strength</i> beton .....	22
Gambar 2.9.	Pengaruh temperatur <i>curing</i> pada perkembangan kekuatan beton .....	23
Gambar 2.10.	<i>Split tensile strength</i> (a) prosedur uji (b) sistem gaya sederhana	24
Gambar 3.1.	<i>Flowchart</i> penelitian.....	26
Gambar 3.2.	Preparasi material .....	28
Gambar 3.3.	Pemilihan <i>mix design</i> .....	29
Gambar 4.1.	Pengamatan visual beton segar SCLAWC .....	36
Gambar 4.2.	<i>Slump flow</i> beton segar SCLWAC (a)kubus, (b)silinder.....	38
Gambar 4.3.	Hubungan waktu yang diperlukan untuk mengalir melewati <i>V-</i> <i>funnel</i> dan mencapai <i>slump flow</i> 500mm (a)kubus, (b)silinder... 40	
Gambar 4.4.	Kuat tekan SCLWAC tanpa PVA dan dengan PVA.....	45
Gambar 4.5.	Kuat belah SCLWAC tanpa PVA dan dengan PVA .....	48
Gambar 4.6.	Modulus elastisitas SCLWAC tanpa PVA dan dengan PVA.....	50
Gambar 4.7.	Pengamatan SCLWAC menggunakan SEM .....	51

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Klasifikasi <i>lightweight concrete</i> .....	11
Tabel 2.2. <i>Visual Stability Index Rating</i> (ASTM C 1611) .....	19
Tabel 2.3. Kriteria <i>workability</i> untuk <i>fresh SCC</i> .....	20
Tabel 4.1. Analisa agregat kasar dan halus .....	31
Tabel 4.2. Analisa komposisi kimia .....	32
Tabel 4.3. Identifikasi <i>fly ash</i> yang digunakan.....	33
Tabel 4.4. Susunan <i>mix trial SCLWAC</i> .....	34
Tabel 4.5. Pemilihan <i>mix design</i> menurut <i>workability</i> , kekuatan, dan <i>density</i> .	35
Tabel 4.6. Perbandingan <i>mix design</i> dari berbagai penelitian.....	37
Tabel 4.7. Hasil uji Kuat Tekan ( $f_c$ ) SCLWAC .....	42
Tabel 4.8. Hasil <i>one sample t-Test</i> dari uji kuat tekan ( $f_c$ ) SCLWAC.....	42
Tabel 4.9. Hasil uji Kuat Belah ( $f_{ct}$ ) SCLWAC .....	44
Tabel 4.10. Hasil uji <i>one sample t-Test</i> dari uji kuat belah ( $f_{ct}$ ) SCLWAC.....	44
Tabel 4.11. Hasil perhitungan modulus elastisitas ( $E_c$ ) .....	45

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 : Analisa XRD ( <i>X-ray diffraction</i> ).....	58
Lampiran 2 : Hasil uji <i>workability</i> dalam pemilihan <i>mix design</i> .....	60
Lampiran 3: Beton segar ( <i>fresh concrete</i> ) Mix D kubus dan silinder.....	64
Lampiran 4: Analisa statistik hasil uji pada beton keras ( <i>hardened concrete</i> ) Mix D Kubus dan Silinder .....	67
Lampiran 5: Bahan dan alat penelitian SCLWAC- <i>pumice</i> .....	79
Lampiran 6: Alur penelitian SCLWAC- <i>pumice</i> .....	80



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Lightweight aggregate concrete*, LWAC, bukan merupakan suatu penemuan baru didalam teknologi beton. LWAC telah diketahui sejak zaman dahulu oleh berbagai bangsa seperti Babylon, Yunani, Roma, dan Turki. LWAC tersebut dibuat dengan memakai *natural aggregate* yang berasal dari gunung api seperti *pumice* dan *scoria*.

Ketika cairan panas lava dari gunungapi mengalami pendinginan cepat, lava yang mengandung udara dan gas tidak sempat mengalami proses kristalisasi sehingga menghasilkan material ringan yang *porous* dan reaktif yang dikenal sebagai *pumice* (S. Chandra, L. Berntsson, 2002).

Secara geografis Indonesia merupakan daerah *ring of fire* (cincin api), yaitu daerah yang sering terjadi gempa bumi dan letusan gunungapi, mengakibatkan adanya sebaran gunungapi mulai dari pulau Sumatera, Jawa, Bali, Lombok, Sumbawa, Flores, Laut Banda, Sulawesi, Kep. Sangihe, dan Halmahera sebanyak 119 gunung, dimana dari beberapa gunungapi tersebut mengerupsikan material *pumice* (USGS, 2003).

Sampai saat ini, kegunaan *pumice* di negeri kita banyak digunakan untuk filter air, laundry jeans, dan kosmetik. *Pumice* juga merupakan komoditi ekspor dari Nusa Tenggara Barat, daerah Ijobalit dan Tanjung (Lombok Barat), dengan tujuan Hongkong dan Jepang (Bappenas, 2009). Sedangkan pemanfaatannya sebagai material konstruksi dalam negeri masih belum banyak.

Padahal, pemanfaatan *pumice* sebagai material konstruksi memiliki beberapa keuntungan antara lain dapat menurunkan biaya konstruksi, dapat menghasilkan *lightweight concrete* dengan density 30% lebih ringan daripada *normal concrete* (K.M.A Hossain, 2008), memiliki rasio kekuatan/berat yang tinggi, memiliki koefisien konduktivitas termal yang rendah, ketahanan terhadap api yang lebih baik, meningkatkan durabilitas, dan mengurangi resiko kerusakan struktur akibat dari gempa bumi (N.A.Libre, et al., 2011).

Selain itu, *pumice* dapat juga berfungsi sebagai *reservoir* air internal pada *High Performance Concrete* (HPC). HPC memiliki keunggulan didalam sifat mekanik dan durabilitas. Namun, pada penerapannya mengalami beberapa kesulitan terutama kepekaannya terhadap pengeringan sendiri (*self-dessication*) dan penyusutan sehingga menimbulkan *cracking*. Teknik *conventional curing* tidak efektif dalam menghilangkan *cracking* ini karena migrasi air kedalam beton terhambat oleh ketatnya pasta semen. Strategi yang efektif untuk mengatasi masalah ini adalah penggunaan *lightweight aggregate*, misalnya *pumice*, yang direndam didalam air sebagai *reservoir* air internal (P. Lura et al., 2004).

Selain keuntungan, *pumice* juga memiliki beberapa masalah. R. Gul, R. Sahin, R. Demirboga (1997) meneliti pengaruh rasio semen dan *pumice aggregate* terhadap beberapa sifat mekanik pada LWAC dan menyimpulkan bahwa meningkatnya rasio *pumice aggregate* akan menurunkan *compressive strength* beton (N.A.Libre, et al., 2011). Karena beratnya yang ringan dan memiliki *inner void*, *lightweight aggregate*, misalnya *pumice*, dapat dengan mudah menyerap air dan mengapung selama proses *mixing*, dimana hal tersebut dapat memperburuk sifat *workability*, yang dinamakan segregasi, dari campuran (B. Chen, J. Liu, 2005). Untuk menghindari masalah tersebut, pada penelitian ini direkomendasikan menggunakan metode *mix design Self-Compacting Concrete* (SCC) dalam pembuatan LWAC (H. Mazaheripour, et al., 2011).

Dari berbagai kajian yang telah dilakukan, umumnya *self-compacting lightweight aggregate concrete* diproduksi menggunakan semen portland biasa (OPC Tipe I) sedangkan penelitian untuk mengkaji sifat *self-compacting* pada beton yang terbuat dari semen PCC belum banyak dilakukan.

Akhirnya, pada tesis ini akan menyajikan peran *pumice* sebagai *coarse aggregate* (agregat kasar) dan semen PCC sebagai binder dalam pembuatan *Self-Compacting Lightweight Aggregate Concrete* (SCLWAC) dengan densitas antara 1600-2000 kg/m<sup>3</sup>.

## 1.2 Perumusan Masalah

Penelitian ini membahas *workability* (*slump flow*,  $T_{500}$ , *V-funnel test*, *Visual Stability Index-VSI*), *compressive strength* (kuat tekan), *split tensile strength* (kuat belah), dan *modulus elastisitas* dari *mix design self-compacting lightweight aggregate concrete* (SCLWAC) yang diperoleh.

## 1.3 Batasan Penelitian

Penelitian ini menggunakan material penyusun yang terdiri dari semen PCC, *fly ash*, *pumice*, pasir, air dan *superplasticizer* VISCOCRETE. Waktu *curing* selama 3 s/d 28 hari didalam air.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui peran *pumice* dalam mereduksi densitas beton namun memiliki kekuatan yang tinggi dalam pembuatan SCLWAC.
2. Untuk memperoleh *mix design* dari SCLWAC beserta sifat *workability* (*slump flow*,  $T_{500}$ , *V-funnel test*, *Visual Stability Index-VSI*), kuat tekan (*compressive strength*), kuat belah (*splitting tensile strength*), modulus elastisitas pada umur 3 s/d 28 hari dan densitas umur 28 hari.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah menambah ilmu pengetahuan tentang teknologi pembuatan SCLWAC-*pumice* serta aplikasinya, dan teknik karakterisasi beton SCLWAC-*pumice*.

## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

*Self-Compacting Concrete* (SCC) merupakan suatu kemajuan dalam teknologi beton yang dapat mengalir kedalam bekesting (*formwork*) di bawah massanya sendiri tanpa adanya getaran (*vibration*) atau segregasi. Penerapan SCC memiliki keterlibatan yang berarti dalam penentuan, produksi, dan penempatan beton. Penggunaan SCC dapat meningkatkan produktivitas konstruksi, meningkatkan keselamatan kerja, dan memperbaiki *hardened properties*. Akan tetapi, biaya material untuk SCC umumnya lebih tinggi dibandingkan beton konvensional, dan produksi SCC mungkin memerlukan keahlian teknis dan langkah-langkah pengendalian mutu. Untuk memastikan bahwa sifat menguntungkan dari SCC dapat dicapai secara ekonomis maka pemilihan yang tepat dari konstituen dan proporsi campuran (*mix design*) untuk SCC adalah sangat penting (E.P. Koehler, D.W. Fowler, 2007). Pada Bab 2 ini akan memperikan pustaka tentang material penyusun SCC, metode-metode proporsi campuran SCC, *fresh properties*, dan *hardened properties* SCC.

#### **2.1. Material Penyusun SCC**

Material penyusun SCC terdiri dari semen, *fly ash*, agregat, *chemical admixture*, dan *mixing water*.

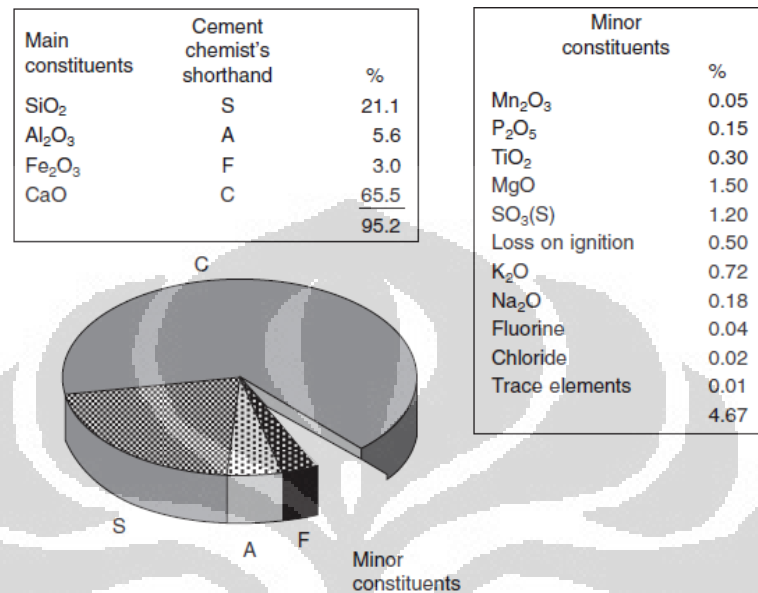
##### **2.1.1. Semen**

Semen/*portland cement* pada dasarnya adalah semen kalsium silikat, yang diproduksi dengan cara pembakaran untuk menghasilkan *partial fusion*, pada suhu sekitar 1500 °C, dari campuran antara *limestone* (*calcium carbonat*) dan sejumlah *clay* yang cocok, homogen dan halus.

Pembuatan semen pada dasarnya adalah proses kimia industri dan memiliki banyak kesamaan dengan pembuatan bahan kimia berat seperti *sodium hydroxide* dan *calcium chloride*. Komposisi kimia semen portland klinker terdiri dari empat oksida utama yaitu CaO (*lime*), SiO<sub>2</sub> (silika), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alumina), dan Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (besi oksida). Untuk menyederhanakan deskripsi komposisi kimia, bentuk



singkatan digunakan oleh ahli kimia semen di mana empat oksida disebut masing-masing sebagai C, S, A dan F. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.1 (G.Moir, 2003).



[Sumber: G. Moir, 2003]

**Gambar 2.1. Komposisi kimia semen portland klinker**

Hidrasi semen portland melibatkan reaksi fase kalsium silikat anhidrat dan fase aluminat dengan air membentuk fase *solid* hidrasi. Fase *solid* hidrat ini menempati ruang yang lebih luas dari partikel anhidrat dan menghasilkan massa yang kaku dimana porositas adalah fungsi dari rasio *water per cement* (w/c) didalam campuran. Campuran tersebut memiliki plastisitas yang cukup padat, semakin rendah w/c, semakin tinggi kuat tekan pasta semen/mortar/beton dan semakin tinggi ketahanannya terhadap penetrasi oleh zat yang berpotensi merusak yang berasal dari lingkungan (G. Moir, 2003).

Hidrasi semen melibatkan kumpulan pasangan proses kimia, yang masing-masing terjadi pada laju yang ditentukan oleh sifat dari proses dan oleh keadaan dari sistem pada saat itu. Proses-proses ini termasuk dalam salah satu kategori sebagai berikut:

- *Dissolution/dissociation* meliputi pelepasan unit molekul dari permukaan padatan pada saat kontak dengan air. Review secara komprehensif tentang kinetika dissolusi dijelaskan oleh Dove dkk.

- *Diffusion* menggambarkan perpindahan dari komponen larutan melewati volume pori pasta semen atau sepanjang permukaan padatan di lapisan adsorpsi.
- *Growth* meliputi pertumbuhan permukaan, penggabungan unit molekul ke dalam struktur padatan kristalin atau amorf dalam lapisan *self-adsorption*nya.
- *Nucleation* memulai pengendapan padatan heterogen pada permukaan *solid* atau homogen didalam larutan, hal tersebut terjadi ketika *bulk free energy* yang menggerakkan gaya untuk membentuk padatan melebihi energi pembentuk antarmuka solid-liquid baru.
- *Complexation*, reaksi antara ion-ion sederhana untuk membentuk ion kompleks atau molekul kompleks pada permukaan solid.
- *Adsorption*, akumulasi dari ion-ion atau unit molekul lain pada antarmuka, seperti permukaan partikel solid didalam liquid (Bullard et al., 2011).

Reaksi kimia hidrasi semen sangat kompleks yang terdiri dari reaksi kimia fase silikat ( $C_3S$  dan  $C_2S$ ) dan fase aluminat ( $C_3A$  dan  $C_4AF$ ). Pada fase silikat,  $C_3S$  dan  $C_2S$  bereaksi dengan air untuk menghasilkan kalsium silikat hidrat *amorfo* yang dikenal sebagai gel C-S-H dimana C-S-H ini berfungsi sebagai 'lem' utama pengikat antara agregat dengan pasir didalam beton.  $C_3S$  jauh lebih reaktif dibandingkan  $C_2S$ . C-S-H yang diproduksi oleh  $C_3S$  dan  $C_2S$  memiliki rasio Ca/Si sekitar 1,7. Hal ini jauh lebih rendah daripada rasio 3:1 didalam  $C_3S$  dan kelebihan Ca diendapkan sebagai kristal kalsium hidroksida (CH). Hidrasi  $C_2S$  juga menghasilkan beberapa formasi CH. Persamaan di bawah ini menerangkan proses reaksi hidrasi semen:



Pada fase aluminat, dengan tidak adanya bahan aditif kalsium sulfat  $C_3A$  bereaksi secara cepat membentuk fase  $C_2AH_8$  dan  $C_4AH_{19}$ , yang kemudian mengkonversi menjadi  $C_2AH_6$ . Reaksi  $C_2AH_6$  merupakan reaksi eksotermis secara cepat dan tinggi. Apabila  $C_3A$  dicampur dengan *gypsum* halus ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) atau *hemihydrate* ( $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ ) terlebih dahulu sebelum dicampur dengan air maka

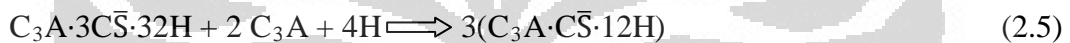
reaksi awal dikendalikan oleh pembentukan lapisan pelindung *ettringite* pada permukaan kristal  $C_3A$ . Reaksi tersebut dapat diringkas sebagai berikut:



Dimana dalam notasi kimia  $\bar{S}$  melambangkan  $SO_3$  dan H melambangkan  $H_2O$  dengan kata lain



Lebih cepat penguraian bentuk dehidrat *gypsum* menjamin pasokan ion kalsium dan sulfat terlarut dan lebih efektif dalam mengendalikan reaksi reaktif dari  $C_3A$ . Dalam sebagian semen Portland komersial akan ada sulfat yang tersedia tidak cukup untuk mempertahankan pembentukan *ettringite*. Ketika sulfat yang tersedia telah habis *ettringite* bereaksi dengan  $C_3A$  untuk membentuk fase dengan kandungan  $SO_3$  rendah dikenal sebagai *monosulfate*. Reaksi dapat diringkas sebagai berikut:



(G. Moir, 2003).

### 2.1.2. Fly ash

*Fly ash* telah berhasil dengan sukses dalam pembuatan SCC. Penggunaan *fly ash* umumnya meningkatkan *workability* dan penundaan pembentukan kekuatan beton. Dalam *rheology*, *fly ash* mengurangi *yield stress* tapi dapat meningkatkan atau menurunkan *plastic viscosity*. Contohnya, Sonebi (2004) menemukan bahwa penggunaan *fly ash* mengurangi *yield stress* dan *plastic viscosity* dari SCC. Park, Noh, dan Park (2005), menemukan bahwa *fly ash* mengurangi sedikit *yield stress* tapi meningkatkan *plastic viscosity* dari pasta yang diberi *superplasticizer*. Shadle dan Somerville (2002) mengungkapkan bahwa *fly ash* dapat juga mengurangi *bleeding* dan meningkatkan stabilitas. Pengaruh *fly ash* tergantung pada banyaknya semen yang diganti oleh *fly ash* dalam satuan volum atau berat (E.P. Koehler, D.W. Fowler, 2007, p. 38).

Ketika batubara terbakar didalam furnace pada suhu 1250 °C dan 1600 °C, material-material yang tidak terbakar bergabung untuk membentuk *spherical glassy droplet* silika ( $SiO_2$ ), alumina ( $Al_2O_3$ ), besi oksida ( $Fe_2O_3$ ) dan sedikit senyawa-senyawa lainnya. Pada saat *fly ash* ditambahkan ke dalam beton reaksi *pozzolanic* terjadi antara *silica glass* ( $SiO_2$ ) dan *calcium hydroxide*  $Ca(OH)_2$  atau

*lime*.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (*hydrated lime*) dihasilkan dari reaksi semen portland dan air. Karena kelarutannya terbatas, partikel-partikel dari *hydrated lime* membentuk ruang *interstitial*. Dengan bertambahnya *moisture*, *lime* bereaksi dengan *fly ash*, menghasilkan produk hidrasi tambahan. Reaksinya sebagai berikut

*Calcium hydroxide + silica = tricalcium silicate + water*



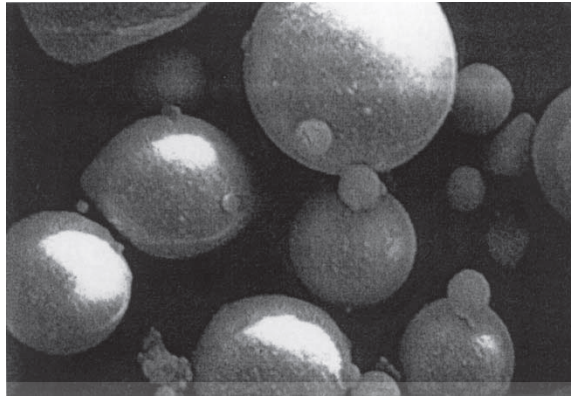
(2.6)

Sehingga, penggabungan *fly ash* didalam beton akan menurunkan panas hidrasi semen yang menguntungkan bagi struktur, contohnya pada struktur bangunan bertingkat (Sofia Utsi, 2008).

*Fly ash* sering memperlambat peningkatan kekuatan beton, tapi umumnya tidak pada kekuatan akhir, dan tergantung pada komposisi dari *fly ash*, dapat mengurangi atau meningkatkan durabilitas dari beton. *Fly ash* dari sumber yang berbeda memiliki komposisi yang berbeda pula dan memiliki pengaruh yang berbeda pada sifat beton. *Fly ash* juga mempengaruhi warna dari beton (J.K. Wight, J.G. MacGregor, 2012).

Partikel *fly ash* 50  $\mu\text{m}$  umumnya berbentuk *spherical* (Gambar 2.2) dan ukuran yang lebih besar cenderung menjadi bentuk *irregular*. Partikel *spherical* memberi keuntungan yang berarti pada *fluidity* dari beton. *Fly ash sphere* menunjukkan '*ball bearing*' dalam beton mengurangi sejumlah air yang diperlukan untuk *workability* yang baik. Secara visual, beton yang mengandung *fly ash* memperlihatkan sifat yang lebih kohesif. Adanya pengurangan konten air dapat mengurangi *bleeding* dan *dry shrinkage*.

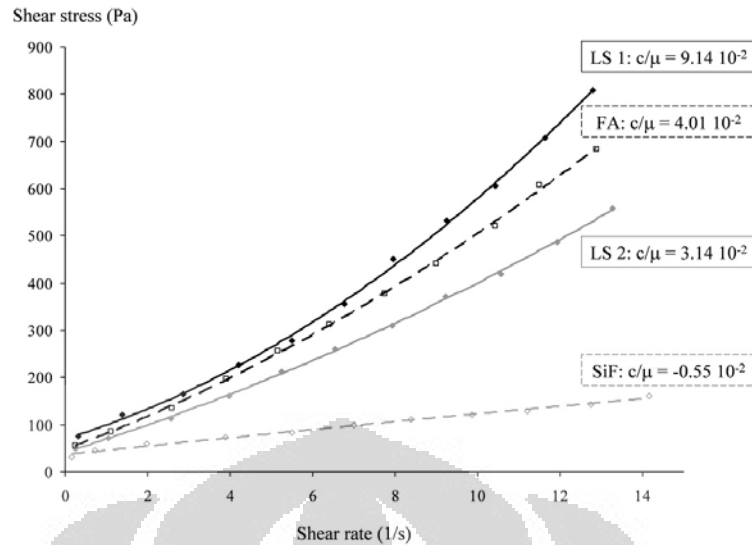
Density partikel *fly ash* 2300  $\text{kg/m}^3$ , lebih rendah secara signifikan dibandingkan semen portland 3120  $\text{kg/m}^3$ . Untuk itu, apabila *fly ash* digunakan sebagai pengganti semen portland dalam satuan berat memberikan volume yang lebih besar sebagai material *cementitious* (R. Lewis, et al., 2003).



[Sumber: R. Lewis, et al., 2003]

### **Gambar 2.2. Partikel *fly ash spherical***

Pada Gambar 2.3 menunjukkan pengaruh dari perbedaan *filler* terhadap intensitas dari *shear thickening*. Hal ini jelas bahwa SCC dengan *filler silica fume* tidak menunjukkan adanya *shear thickening*, hal ini berbeda jelas pada SCC dengan *filler* LS 1, LS 2 (*limestone*) dan *fly ash*. Hal tersebut mungkin karena ukuran butiran partikel *silica fume* lebih kecil dibandingkan *filler* lainnya. Dan lagi, *critical shear stress* untuk campuran SCC yang mengandung *limestone* (LS 1, LS 2), dan *fly ash* adalah sekitar 300 Pa, sedangkan *stress* pada *maximal shear rate* untuk *silica fume* SCC hanya 160 Pa. Hasilnya, SCC dengan *silica fume* tidak menunjukkan *shear thickening* karena *stress* yang sangat kecil yang diukur dengan *rheometer* yang digunakan untuk melihat kelakuan *shear thickening* (D. Feys, et al., 2009).



[Sumber: D. Feys, et al., 2009]

### Gambar 2.3 Kurva *flow* dari SCC pada fraksi volum sama tapi berbeda *filler*

*High volume fly ash* juga telah dipakai dengan sukses dalam pembuatan SCC. Dengan penggantian semen oleh *fly ash* sebanyak 70-85% menghasilkan SCC dengan kuat tekan 20-30 MPa, sedangkan dengan penggantian semen oleh *fly ash* sebanyak 30-50% menghasilkan kuat tekan 60-90 MPa. Selanjutnya, *High volume fly ash* SCC menunjukkan secara signifikan permeabilitas ion klorida lebih rendah daripada beton normal (P. Dinakar, et al., 2008).

#### 2.1.3. Agregat

*Lightweight aggregate* didefinisikan dalam BS EN 13055 sebagai agregat dengan density partikel kurang dari 2,0 Mg/m<sup>3</sup> atau *dry loose bulk density* kurang dari 1200 kg/m<sup>3</sup>. Propertis ini utamanya berasal dari pori-pori dalam struktur partikel agregat. Untuk beton struktur, persyaratan untuk agregat ringan antara lain memiliki kekuatan yang cukup terhadap *crushing resistance* (BS EN 13055), memungkinkan kekuatan beton lebih dari 20 MPa, menghasilkan beton dengan *oven-dry density* dalam range 1500-2000 kg/m<sup>3</sup> lebih rendah daripada beton konvensional dengan densitas sekitar 2100-2500 kg/m<sup>3</sup> (John Newman & Phil Owens, 2003). Pada Tabel 2.1 menunjukkan klasifikasi *lightweight concrete* menurut RILEM (1978).

**Tabel 2.1. Klasifikasi *lightweight concrete***

Class	I	II	III
Type	Structural	Structural/Insulating	Insulating
Compressive strength (N/mm <sup>2</sup> )	>15,0	>3,5	>0,5
Coeff. of thermal conductivity (W/m. °K)	n/a	<0,75	<0,3
Approx. Density range (kg/m <sup>3</sup> )	1600-2000	<1600	<<1450

[Sumber: J. Newman & P. Owens, 2003]

Dalam pembuatan beton ringan, penyerapan air oleh *lightweight aggregate* memiliki pengaruh yang signifikan. Hal ini, tentu saja, diinginkan untuk mencegah penyerapan air oleh *lightweight aggregate* selama proses pemadatan. Biasanya, sebelum pencampuran *lightweight aggregate* terlebih dahulu direndam didalam air terlebih dahulu atau pencampuran pada saat agregat dalam keadaan basah. Namun, hal tersebut tidak selalu menjadi solusi yang baik untuk semua pembuatan *lightweight concrete*.

Dalam pembuatan konstruksi rumah, kandungan air yang tinggi dalam *lightweight aggregate* mengakibatkan waktu pengeringan yang lama dan tingginya *humidity* didalam ruangan yang menimbulkan masalah bagi konstruksi material lainnya dan untuk manusia. *Pre-wetting* merupakan metode yang paling efektif dan umum digunakan karena sebagian besar penyerapan air selesai selama beberapa menit pertama perendaman. Biasanya, air yang diserap oleh agregat tidak memiliki dampak merugikan pada kekuatan dan durabilitas pada *high strength structural LWAC*. Harus ditekankan bahwa air didalam partikel agregat dapat diabaikan ketika menghitung rasio *water/cement* (w/c) beton.

LWAC yang dibuat dengan memakai *pumice* sebagai agregat kasar dapat menghasilkan beton dengan *density* rendah. *Pumice* adalah agregat vulkanik dan terbentuk ketika lava cair yang kaya SiO<sub>2</sub> mendingin cepat. Cairan magma memiliki banyak udara dan gas yang terperangkap selama pendinginan cepat. Hal ini menjadikan agregat berpori. Pendinginan cepat tidak memungkinkan kristalisasi pada mineral, sehingga mencapai struktur *glassy*.

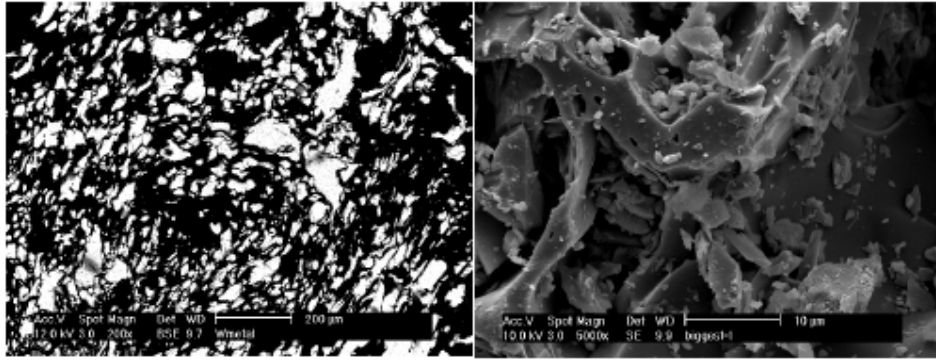
Keuntungannya adalah penurunan berat dari struktur dan fondasi, mengurangi *dead load* yang merupakan faktor penting dalam pembangunan

gedung bertingkat. Hal ini juga, merupakan material yang sangat menarik untuk perbaikan bangunan tua, karena tidak akan meningkatkan beban total struktur. Juga, dengan penggunaan *pumice* yang halus dapat menghasilkan mortar dengan sifat isolasi termal yang baik dan proses pembuatan mortar sebagai isolasi termal jauh lebih ekonomis (S. Chandra., & L. Berntsson, 2002).

Pada Gambar 2.4 menunjukkan gambaran dari *scanning electron microscope* (SEM) dari struktur pori dalam butiran *pumice*. Sebelum pengamatan SEM, butiran *pumice* diisi dengan *Wood's metal* berdasarkan prosedur yang ada di karya tulisan ilmiah K.L. Willis, et al (1998). Pada gambar tersebut pori-porinya diisi dengan *Wood's metal* yang terlihat terang dan struktur *pumice* yang gelap (Gambar 2.4, kiri). Range dari pori-porinya dari ratusan mikron sampai beberapa mikron. Analisa pada Gambar 2.4 menunjukkan adanya 40-50 % porositas. Pori-porinya tampak tidak teratur dan terhubung dengan baik. Pada pembesaran yang lebih tinggi pada permukaan patahan (Gambar 2.4, kanan) menyajikan fitur porositas halus yang sama. Namun, pengamatan SEM pada sampel *pumice* yang berbeda menunjukkan bahwa bentuk dari pori-porinya bervariasi dari ukuran kasar sampai halus, *irregular*, dan *rounded* dan bahkan pada daerah yang berbeda dari sampel yang sama (P. Lura, et al., 2004, p. 139).

Adanya pori-pori dalam *pumice* ini dapat berfungsi sebagai *reservoir* air internal pada *High Performance Concrete* (HPC). HPC memiliki keunggulan didalam sifat mekanik dan durabilitas, namun pada penerapannya mengalami beberapa kesulitan terutama kepekaannya terhadap pengeringan sendiri (*self-dessication*) dan penyusutan sehingga menimbulkan *cracking*. Teknik *conventional curing* tidak efektif dalam menghilangkan *cracking* ini karena migrasi air kedalam beton terhambat oleh ketatnya pasta semen. Strategi yang efektif untuk mengatasi masalah ini adalah penggunaan *lightweight aggregate*, misalnya *pumice*, yang direndam didalam air sebagai *reservoir* air internal (P. Lura, et al., 2004).





[Sumber: P. Lura, et al., 2004]

**Gambar 2.4. SEM *pumice* aggregate**

K.M.A. Hossain (2008) mempelajari penggunaan *pumice* sebagai campuran dengan semen Tipe I, Tipe II, dan Tipe V, dimana campuran beton tersebut diekspos pada lingkungan *marine*. Hasilnya, penggunaan semen Tipe I dan Tipe II dicampur dengan *pumice* (antara 10% dan 20%) telah meningkatkan beton terhadap serangan air laut. Penggunaan *pumice* dalam campuran dengan semen portland dengan konten  $C_3A$  sangat rendah, seperti semen Tipe V, tidak menunjukkan ketahanan terhadap serangan air laut lebih besar daripada semen portland Tipe I atau Tipe II di lingkungan *marine*. Selain itu, L. Cavaleri, N. Miraglia, M. Papia (2002) mengungkapkan bahwa *pumice* dapat dipakai sebagai alternatif agregat ringan buatan dalam pembuatan beton struktur *wall panel*. Juga, dapat dipakai sebagai pembuatan *precast*, bangunan rumah, dan bangunan lainnya (K.Grasser, & G. Minke, 1990).

Sedangkan dalam pembuatan SCC umumnya memiliki beberapa kombinasi agregat total yang lebih rendah, jumlah relatif agregat halus lebih banyak daripada agregat kasar, dan ukuran agregat maksimum lebih kecil (E.P. Koehler, & D.W. Fowler, 2007).

#### 2.1.4. *Chemical admixture*

SCC umumnya dibuat dengan *polycarboxylate based high range water reducing admixture* (HRWRA), yang merupakan peningkatan dari *sulfonat-based* HRWRA seperti *naphthalene sulfonate formaldehyde condensate* (NSFC) dan *melamine sulfonate formaldehyde condensate* (MSFC).

*Polycarboxylate based* HRWRA berbeda dari *sulfonate-based* HRWRA dalam struktur dan modus kerjanya. *Sulfonate-based* HRWRA terdiri dari polimer

*anionic* yang menyerap partikel semen dan mengalirkan muatan negatif, sehingga menghasilkan *electrostatic repulsion*. Sedangkan *polycarboxylate-based* HRWRA terdiri dari rantai polimer utama *carboxylic group* dan *polyethylene oxide* pada rantai cabangnya. Ion *carboxylic* pada rantai utama polimer menyerap partikel semen dan *nonionic side chains* memperpanjang keluar dari partikel semen. Rantai cabang secara fisik memisahkan partikel semen, yang disebut sebagai *steric hindrance*. *Polycarboxylate-based* HRWRA dapat berfungsi sebagai *electrostatic repulsion* dan *steric hindrance* atau hanya dengan *steric hindrance* tergantung pada struktur polimer. Penurunan *electrostatic repulsion* diindikasikan dengan kurang negatif atau mendekati *-zero zeta-* pada pengukuran potensial untuk pasta semen dengan *polycarboxylate-based* HRWRA dibandingkan dengan pasta semen dengan *Sulfonate-based* HRWRA (E.P. Koehler, & D.W. Fowler, 2007).

Dibandingkan dengan *sulfonate based* HRWRA, *polycarboxylate based* HRWRA umumnya menghasilkan karakteristik rheologi yang lebih menguntungkan untuk produksi SCC. *Polycarboxylate based* HRWRA mampu mengurangi *yield stress* lebih baik daripada NSFC dan MSFC *based* HRWRA. Penurunan *plastic viscosity* pada *Polycarboxylate based* HRWRA lebih rendah daripada *sulfonate-based* HRWRA. Yamada et al. (2000) menemukan bahwa *Polycarboxylate based* HRWRA dapat mengurangi *plastic viscosity* pada rasio w/c yang tinggi, tetapi hanya sedikit pengurangan *plastic viscosity* pada rasio w/c yang rendah (E.P. Koehler, & D.W. Fowler, 2007, p. 6).

Kinerja *polycarboxylate-based* HRWRA dipengaruhi oleh sifat semen, termasuk *specific surface area*, distribusi ukuran partikel, tipe sulfat, dan konten C<sub>3</sub>A, dan konten alkali. Perbedaan kinerja kombinasi dari berbagai *cement-admixture* biasanya lebih signifikan pada rasio w/c rendah. Aksi *polycarboxylate-based* polymer yang ditambahkan ke campuran beton dapat diklasifikasikan didalam salah satu dari ketiga kategori ini, yaitu: polimer mungkin dikonsumsi secara *intercalation*, *coprecipitation*, atau *micellization*, sehingga menghasilkan suatu formasi dari fase organo-mineral, polimer ini mungkin diserap oleh partikel semen, atau menyisahkan partikel yang tidak terlarut didalam fase cairan. Karena

kinerja dari HRWRA tergantung pada reaksi awal pada dua jam pertama, maka *initial reactivity* dari semen menjadi penting.

Kemudian, kinerja *polycarboxylate-based* HRWRA dipengaruhi oleh suhu. Yamada, Yanagisawa, dan Hanehara (1999) menemukan bahwa pada suhu rendah, fluiditas awal rendah tetapi meningkat dengan waktu karena peningkatan lebih lambat di area permukaan semen, tingginya konsentrasi ion sulfat awal dan cepatnya penurunan konsentrasi ion sulfat. Pada suhu tinggi, fluiditas menurun lebih cepat karena cepatnya laju reaksi dari semen, yang menghasilkan peningkatan area permukaan semen dan penurunan konsentrasi ion sulfat yang lambat (E.P. Koehler, & D.W. Fowler, 2007, p. 8).

*Polycarboxylate-based* HRWRA lebih sensitif daripada *sulfonate-based* HRWRA terhadap sejumlah energi *mixing*. Blask dan Honer (2003) menemukan bahwa peningkatan energi *mixing* secara dramatis mengurangi *shear resistance* dari pasta semen dengan menggunakan *naphtalene sulfonate-based* HRWRA. Takada dan Walraven (2001) menemukan bahwa meningkatnya energi *mixing* untuk campuran pasta semen dapat mengurangi *plastic viscosity* secara signifikan tetapi tidak memiliki efek pada *yield stress*. Perbedaannya adalah dikaitkan dengan dispersi yang lebih baik dari partikel *powder* dan untuk konten air yang banyak.

Adanya *clay* didalam agregat dapat mengurangi kinerja dari *Polycarboxylate-based* HRWRA secara signifikan. Jardine et al. (2002), Jeknavorian et al. (2003) dan Jardine et al. (2003) meneliti penggunaan *Polycarboxylate-based* HRWRA dengan agregat yang mengandung *clay*. *Clay* ini akan mengembang saat dibasahi oleh air dan menyerap *Polycarboxylate-based polymer*, menghasilkan kebutuhan dosis yang tinggi dan kehilangan *workability*. Salah satu solusi untuk masalah ini adalah merubah urutan pencampuran sehingga air, HRWRA, dan semen dicampur sebelum penambahan agregat yang mengandung *clay*. Solusi lainnya adalah memanfaatkan *sacrificial agent* yang akan menyerap mineral *clay*, yang cocok dengan *admixture* lainnya, dan tidak merugikan sifat beton. *Sacrificial agent* yang disarankan adalah *polyethylene glycol*, meskipun ditemukan bahwa agen ini dapat mengurangi *workability*. Ketiga, garam kalsium seperti *calcium nitrate* dapat ditambahkan sebelum

penambahan pasir. Kombinasi dari ketiga metode ini dapat digunakan. Solusi tambahan adalah menambahkan *polyphosphate*, yang dapat digunakan secara independen dalam urutan penambahan (E.P. Koehler, & D.W. Fowler, 2007, p. 9).

#### 2.1.5. *Mixing water*

Belum ada standar yang menentukan kualitas air untuk penggunaan didalam pencampuran beton. Biasanya air yang digunakan adalah air tawar, tidak berbau dan tidak berwarna. Umumnya pH air yang digunakan antara 6,0 dan 8,0. Air garam atau payau tidak boleh dipakai sebagai *mixing water*, karena klorida dan garam lain yang ada didalam air akan menyerang struktur beton dan akan memicu korosi pada penguat beton (J.K. Wight, & J.G. MacGregor, 2012).

## 2.2. Metode-Metode Proporsi Campuran SCC

Beberapa metode proporsi campuran SCC telah dikembangkan sejak tahun ke-80 hingga saat ini.

Okamura dan Ozawa (1995 dan 1996) telah menjadi pionir SCC. Metode proporsi campuran mereka berawal dari melakukan uji pasta, kemudian uji mortar, kemudian uji *concrete*. Ide awal mereka melakukan pengujian pada pasta dan mortar adalah untuk mengetahui sifat dan kompatibilitas antara *superplasticizer*, semen, agregat halus dan bahan *pozzolan* terhadap sifat *self compacting*. Ringkasan proporsi campuran SCC mereka terdiri dari agregat kasar sebanyak 50% dari volume beton, agregat halus 40% dari volume mortar, rasio *water/powder* (w/p) antara 0,9-1 tergantung dari sifat *powder*, *superplasticizer* dan rasio w/p akhir menentukan sifat *self compacting*.

de Larrard dan Sedran (1994-1999) mengembangkan SCC berdasarkan *Compressive Packing Model* (CPM). Data yang dibutuhkan untuk perhitungan adalah distribusi ukuran, *density*, *packing density* dari bahan penyusun, titik jenuh dari *superplasticizer*. Sedangkan perilaku alirnya dikarakterisasi dengan *concrete rheometer* yang bernama BTRHEO yang dikembangkan oleh Laboratoire Central des Ponts et Chaussees (LCPC).

Su et al. (2001) dan Miao (2003) telah mengembangkan SCC dengan kekuatan medium. Mereka mulai dengan *Packing Factor* (PF) untuk agregat (pasir dan krikil). PF didefinisikan sebagai perbandingan massa agregat padat

yang rapat (*tightly*) dengan massa agregat yang longgar (*loosely*) dan PF ini akan mempengaruhi konten agregat di dalam SCC. Apabila nilai PF lebih tinggi maka jumlah agregat kasar dan halus yang dibutuhkan juga tinggi. Jika nilai PF lebih rendah maka akan meningkatkan fluiditas SCC. Para penulis melaporkan beton SCC kekuatan medium memiliki konten pasta antara 290-320 l/m<sup>3</sup>, dan konten binder 370 kg/m<sup>3</sup> dimana komposisi tersebut lebih ekonomis. Para penulis juga menyarankan memakai PF 1,16-1,18 untuk mengontrol *workability* dari *fresh concrete*.

Melalui tinjauan literatur, Domone (2006a) telah menganalisa 68 studi kasus pada *self compacting concrete* yang telah digunakan antara tahun 1993 dan 2003. Berdasarkan evaluasi pada campuran SCC yang berbeda, Domone (2006a) mengamati bahwa terdapat nilai median pada masing-masing konten penyusun SCC, yaitu *powder* bervariasi antara 425 dan 625 kg/m<sup>3</sup>, agregat kasar sekitar 31%, pasta 35% dan agregat halus terhadap mortar sekitar 47%. Hal ini menunjukkan bahwa adanya kemungkinan untuk membuat SCC dengan komposisi agregat halus yang lebih banyak (Sofia Utsi, 2008, p. 15-19).

### **2.3. *Fresh SCC Properties***

SCC diketahui memiliki kemampuan mengisi (*filling ability*), kemampuan melewati (*passing ability*) dan kemampuan anti segregasi (*segregation resistant*). SCC juga memiliki nilai *yield strees* rendah untuk memastikan kemampuan alir yang tinggi, ukuran agregat kecil dapat mencegah bloking, dan viskositi yang cukup untuk mencegah segregasi. Dengan demikian, karakterisasi ini akan dijelaskan untuk pengguna untuk mengembangkan campuran yang dirancang SCC.

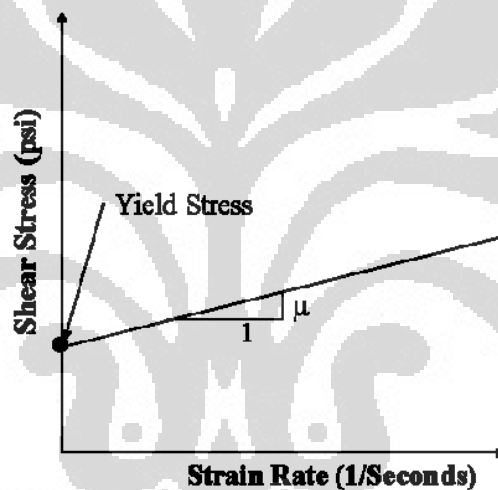
#### **2.3.1 *Rheology***

Menurut E.P. Koehler, & D.W. Fowler, (2007), *rheology* adalah studi tentang aliran dan deformasi materi, memberikan secara langsung terhadap karakterisasi sifat alir SCC. Pemahaman dan perilaku tentang *rheology* menjadi penting dalam pengembangan *self-compacting concrete* dan mempengaruhi kinerja sifat beton segar. *Rheology* beton, pasta, atau mortar dapat dikarakterisasi

oleh *yield stress* dan *plastic viscosity*. *Rheology* dari *fresh concrete*, termasuk SCC, sering didefinisikan oleh *Bingham Fluid Model* dengan memakai persamaan

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (2.7)$$

Pada persamaan (2.7),  $\tau$  adalah *shear stress* dalam psi,  $\tau_0$  adalah *yield stress* dalam psi,  $\mu$  adalah *plastic viscosity* dalam psi, dan  $\gamma$  adalah *shear strain* dalam 1/seconds. Gambar 2.5 menunjukkan bahwa *Bingham Fluid Model* membutuhkan *yield stress* untuk mendapatkan *strain* yang diikuti dengan meningkatkan *shear stress* dengan *shear strain*. Alat ukur yang digunakan untuk mengukur *rheology* dari *fresh concrete* adalah BML viscometer dan BTRHOEM rheometer (J.D. Bailey, 2005).



[Sumber: J.D. Bailey, 2005]

**Gambar 2.5. Bingham fluid model**

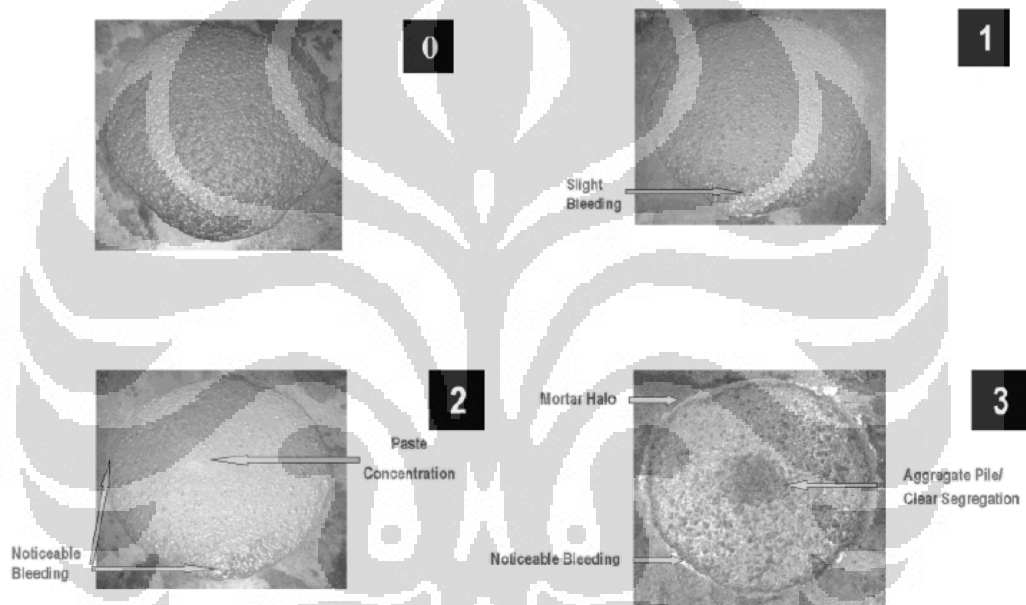
### 2.3.2 Slump flow test (dengan $T_{500}$ dan *Visual Stability Index*)

*Slump Flow Test* merupakan metode uji yang sederhana dan paling banyak digunakan untuk uji SCC. Pada uji ini menyediakan informasi tentang *filling ability* (*flow ability*), *passing ability*.  $T_{500}$  ( $T_{20}$ ) *Test* digunakan untuk mengukur waktu *flow* yang dibutuhkan untuk mencapai ukuran diameter 500 mm atau 20 inch. *Visual Stability Index* (VSI) *Test* memiliki skala 0-3. Skala 0 menunjukkan kestabilan SCC tinggi, sedangkan skala 3 menunjukkan tidak termasuk SCC. Uji ini  $T_{500}$  ( $T_{20}$ ) dan *Visual Stability Index* (VSI) dapat ditentukan bersamaan dengan *slump flow test* (Grace, 2005).

**Tabel 2.2. Visual Stability Index Rating (ASTM C 1611)**

VSI	Criteria
0 = Highly Stable	No evidence of segregation or bleeding.
1 = Stable	No evidence of segregation and slight bleeding observed as sheen on the concrete mass.
2 = Unstable	A slight mortar halo $\leq 0,5$ in. ( $\leq 10$ mm) and/or aggregate pile in the center of the concrete mass.
3 = Highly Unstable	Clearly segregating by evidence of a large mortar halo $>0,5$ in. ( $>10$ mm) and/or a large aggregate pile in the center of the concrete mass

[Sumber: J.D. Bailey, 2005]

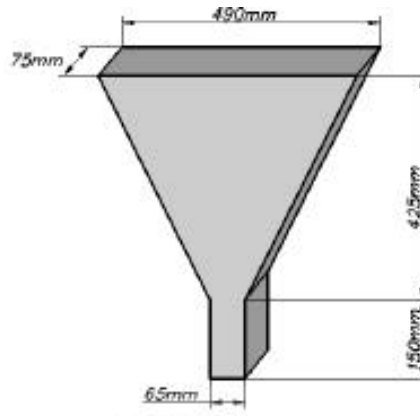


[Sumber: J.D. Bailey, 2005]

**Gambar 2.6. Visual stability index rating**

### 2.3.3 V-funnel test

Pengujian ini telah dikembangkan di Jepang dan telah dipakai oleh Ozawa dll. Pada uji ini memberikan informasi tentang *flow ability (filling ability)* dengan ukuran agregat maksimum 20 mm. Waktu alir tinggi dapat dikaitkan dengan rendahnya kemampuan deformasi yang disebabkan karena viskositas pasta yang tinggi dan tingginya gesekan antar partikel agregat (EFNARC, 2002).



[Sumber: EFNARC, 2002]

**Gambar 2.7. Alat uji V-funnel test**

#### 2.3.4 Kriteria *workability* untuk *fresh SCC*

Beberapa kriteria *Workability* untuk *Fresh SCC* dari berbagai literatur dipaparkan pada Tabel 2.3

**Tabel 2.3 Kriteria *workability* untuk *fresh SCC***

No.	Kriteria	<i>Slump Flow Test</i> (mm)		T <sub>500</sub> Test (s)		<i>V-funnel Test</i> (s)	
		Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
1.	EFNARC*	650	800	2	5	6	12
2.	JSCE**	500	750	3	25	7	20

[Sumber: \*EFNARC, 2002, \*\* H. Mazaheripour, et al., 2011]

## 2.4. *Hardened Concrete*

### 2.4.1 Kuat tekan (*compressive strength*)

Kuat tekan (*compressive strength*) dilakukan pada arah *uniaxial*. Beberapa faktor penting yang mempengaruhi *compressive strength* (kuat tekan beton) antara lain:

1. Rasio air/semen (w/c). Kekuatan beton diatur sebagian besar oleh rasio berat air terhadap berat semen untuk volume tertentu dari beton. Rasio w/c rendah dapat mengurangi porositas pada *hardened concrete* dan kemudian menaikkan sejumlah *interlocking* dari padatan.

2. Tipe semen. Terdapat lima tipe semen dasar yang diproduksi antara lain:



- Normal, Tipe I: digunakan pada konstruksi biasa tanpa membutuhkan propertis khusus.
- Modifikasi, Tipe II: memiliki panas hidrasi lebih rendah daripada Tipe I, dipakai pada lingkungan yang mengandung sulfat.
- *High early strength*, Tipe III: digunakan ketika *High early strength* diinginkan, memiliki panas hidrasi lebih tinggi daripada Tipe I.
- *Low heat*, Tipe IV: digunakan untuk beton bendungan dan struktur lain dimana panas hidrasi lebih rendah.
- *Sulfate resisting*, Tipe V: digunakan untuk pondasi, dinding ruang bawah tanah, saluran pembuangan, dan sebagainya yang terkena tanah yang mengandung sulfat.

Dalam beberapa tahun terakhir, *blended portland cement* diproduksi untuk memenuhi ASTM C1157 *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement* telah mengganti sebagian dari lima tipe semen dasar. Hal ini memungkinkan para desainer untuk memilih berbagai campuran semen.

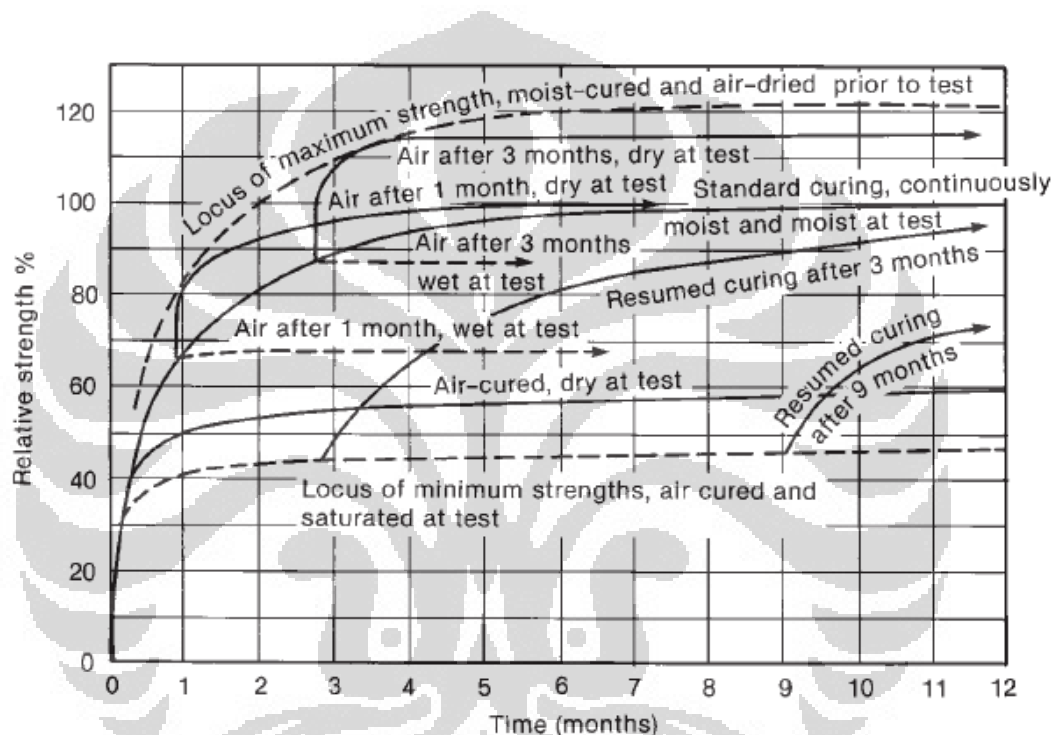
3. *Supplementary cementitious materials*, terdiri dari *ground granulated blast furnace slag* (GGBS), *fly ash* (FA), dan *silica fume* (SF). Tujuan penambahan *cementitious material* adalah supaya lebih ekonomis, mengurangi panas hidrasi, dan meningkatkan *workability* dan kekuatan pada beton. FA dan SF disebut bahan *pozzolan* yang didefinisikan sebagai bahan yang mengandung silika dan alumina yang didalamnya mengandung sedikit sifat semen. Ketika bahan tambahan tersebut masuk kedalam desain campuran, rasio w/c diubah menjadi rasio w/cm, dimana cm merupakan berat total dari semen dan bahan *supplementary cementitious*.

4. Agregat, Kekuatan beton sangat dipengaruhi oleh ikatan antara agregat dan pasta semen. Ikatan tersebut cenderung lebih kuat dengan agregat yang dicrusing. Agregat yang memiliki gradasi baik akan menghasilkan sedikit pori pada beton sehingga beton cenderung akan kuat. Kekuatan beton cenderung menurun apabila ukuran maksimum dari agregat meningkat. Hal ini tampaknya diakibatkan dari tekanan yang lebih tinggi pada antarmuka pasta-agregat. Beberapa agregat bereaksi dengan alkali didalam semen menyebabkan ekspansi

jangka panjang pada beton. Agregat yang berasal dari laut yang tidak dicuci akan mengakibatkan kerusakan struktur beton dengan berjalannya waktu.

5. *Mixing water*

6. Kondisi *moisture* selama *curing*, Perkembangan *compressive strength* beton sangat dipengaruhi oleh kondisi kelembaban selama *curing*. Proses *curing* pada tempat lembab menyebabkan kekuatan beton tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8

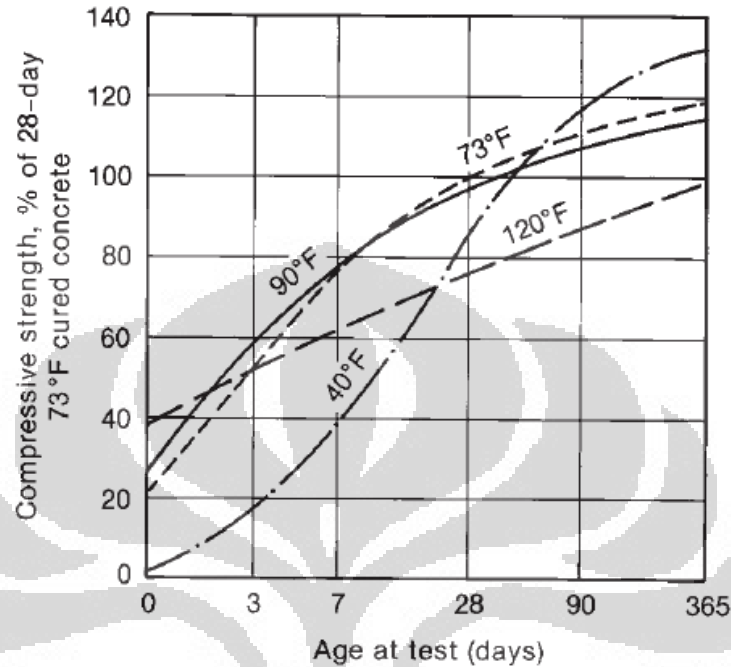


[Sumber: J.K. Wight, & J.G. MacGregor, 2012]

**Gambar 2.8. Pengaruh kondisi kelembaban dan waktu *curing* terhadap *compressive strength* beton**

7. Kondisi temperatur selama *curing*, Pengaruh temperatur *curing* pada perkembangan kekuatan ditunjukkan pada Gambar 2.9. Beton yang ditempatkan pada temperatur *curing* 40 °F memiliki kekuatan yang paling rendah pada umur 3 dan 7 hari, namun pada umur diatas 28 hari beton ini memiliki kekuatan yang lebih tinggi daripada beton yang ditempatkan pada temperatur *curing* diatas 40 °F. Sedangkan beton yang ditempatkan pada temperatur *curing* 120 °F memiliki kekuatan yang paling tinggi pada umur kurang dari 3 hari, namun setelah 3 hari

beton ini memiliki kekuatan yang paling rendah daripada beton yang ditempatkan pada temperatur *curing* dibawah 120 °F.



[Sumber: J.K. Wight, & J.G. MacGregor, 2012]

**Gambar 2.9. Pengaruh temperatur *curing* pada perkembangan kekuatan beton**

8. Umur beton, kekuatan beton akan meningkat seiring dengan bertambahnya umur beton.

9. *Maturity* beton, *Maturity* sebaiknya tidak menjadi satu-satunya penentu dari kekuatan beton.

10. *Rate of loading*, standar uji silinder dilakukan pada *loading rate* sekitar 35 psi per detik (2,5 kg/cm<sup>2</sup> per detik), dan beban maksimum dicapai pada 1½ sampai 2 menit sesuai dengan *strain rate* sekitar 10 *microstrain* per detik. Apabila *rate of loading* lebih rendah mengakibatkan kekuatan beton menurun 75% dari kekuatan standar uji. Apabila *rate of loading* lebih tinggi mengakibatkan kekuatan beton meningkat 115% dari kekuatan standar uji dengan *rate of loading* 30.000 psi/detik (*strain rate* 20.000 *microstrain*/detik). Hal ini terkait dengan kegagalan beban silinder sekitar 0,10-0,15 detik dan laju pembebanan yang parah yang dialami pada saat gempa (J.K. Wight, & J.G. MacGregor, 2012).

#### 2.4.2 Kuat belah (*splitting tensile strength*) (ASTM C496)

Pada kuat belah (*splitting tensile strength*), spesimen silinder dikompresi pada diameter vertikal dalam arah biaksial seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Gaya tekan bekerja hampir seragam pada penampang melintang dibagian atas dan bawah. *Splitting tensile strength*,  $f_{ct}$ , dihitung sebagai (J.K. Wight, & J.G. MacGregor, 2012):

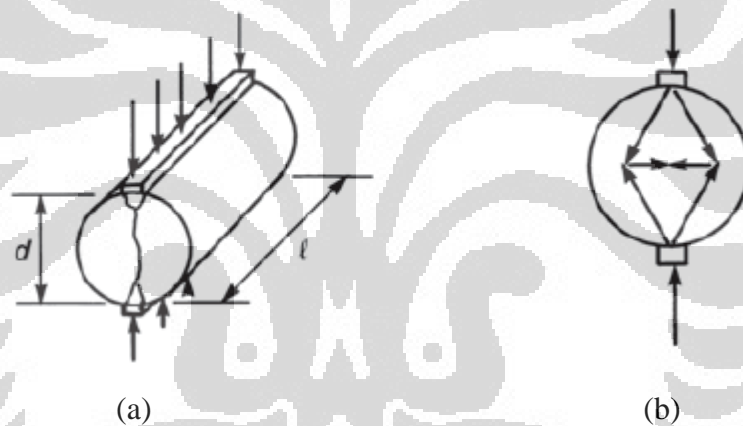
$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld} \quad (2.8)$$

Dimana:  $f_{ct}$  = kuat belah (MPa)

P = beban maksimum (N)

l = panjang spesimen (mm)

d = diameter spesimen (mm)



[Sumber: J.K. Wight, & J.G. MacGregor, 2012]

**Gambar 2.10** *Split tensile strength* (a) prosedur uji (b) sistem gaya sederhana

#### 2.4.3 Modulus elastisitas

Beton merupakan material yang memiliki multi-phase. Menurut Mehta dan Monteiro (1993), modulus elastisitas beton adalah fungsi dari volume fraksi, kepadatan, dan modulus elastisitas dari setiap konstituen (pasta dan agregat) dan karakterisasi dari *interfacial transition zone*. Secara umum, turunnya porositas dari masing-masing konstituen dapat menaikkan modulus elastisitas. Selain itu, ukuran maksimum, grading, bentuk, tekstur, dan mikrostruktur dari agregat dapat mempengaruhi cracking di zona transisi. Modulus elastisitas dari pasta, yang

umumnya lebih rendah daripada agregat, dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain rasio air-semen, konten udara, dan derajat hidrasi.

Modulus elastisitas statis merupakan hubungan antara akar dari tegangan tekan, seperti pada persamaan dari ACI 318 *building code* yang ditunjukkan dibawah ini:

$$E_c = 33(w^{1,5})\sqrt{f'_c} \quad \text{psi.} \quad (2.9)$$

Dimana:  $E_c$  = Modulus elastisitas (psi)

$w$  = densitas (lb/ft<sup>3</sup>)

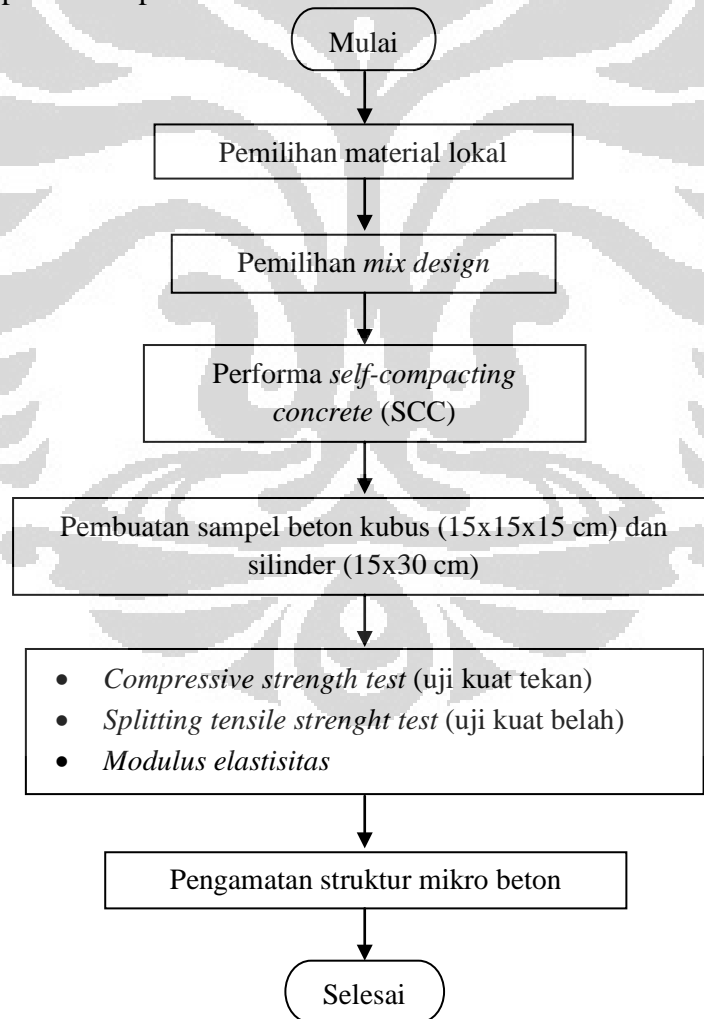
$f'_c$  = kuat tekan maksimum (psi)

Pada persamaan diatas dikembangkan berdasarkan analisa yang dilakukan oleh Pauw (1960) dari beberapa sumber data kuat tekan, modulus elastisitas dan satuan berat. Persamaan tersebut dikembangkan untuk beton kekuatan rendah.

Modulus elastisitas SCC biasanya sama atau sedikit lebih rendah dari beton biasa karena kandungan pasta yang lebih tinggi dan ukuran maksimum agregat berkurang. Klug dan Holschemacher (2003) menemukan bahwa modulus elastisitas SCC umumnya lebih rendah daripada beton biasa. Berdasarkan PCI (Precast Concrete Institute) (2003), modulus elastisitas beton SCC lebih rendah 80% dibandingkan dengan beton biasa. Turcry, Loukili, dan Haidar (2002) menemukan bahwa rasio dari modulus elastisitas (GPa) terhadap Kuat Tekan sekitar 0,6 untuk SCC dan 0,7 untuk beton biasa. Roziere dkk (2005) menemukan bahwa meningkatnya volume pasta dari 29,1% sampai 45,7% sedangkan w/cm konstan akan menurunkan modulus elastisitas pada umur 28 hari sebesar 14%. Persson (2001) menemukan bahwa pada level kuat tekan konstan, SCC dan beton biasa menunjukkan modulus elastisitas yang sama (E.P. Koehler, & D.W. Fowler, 2007, p. 67-69).

### BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian dalam pembuatan *self-compacting lightweight aggregate concrete* (SCLWAC) meliputi pemilihan material lokal, pemilihan *mix design* berdasarkan pengamatan performa *self-compacting* sesuai dengan ASTM C 1611/VSI (*Visual Stability Index*) dari no. 0-1, kuat tekan beton terbesar dan density terkecil pada umur 28 hari. *Mix design* yang terpilih diuji sifat *self-compacting* kembali sebanyak 4 (empat) kali sebelum dibuat sampel beton kubus dan silinder. Selanjutnya, dilakukan uji kuat tekan (*compressive strength*), kuat belah (*splitting tensile strength*), modulus elastisitas yang mengacu ACI 318 dan pengamatan struktur mikro menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.



**Gambar 3.1. Flowchart penelitian**

### 3.1 Material

Material yang digunakan untuk membuat *self-compacting lightweight aggregate concrete* (SCLWAC) adalah *pumice*, pasir, semen PCC, *fly ash*, *superplasticizer*, air, dan sedikit serat *Poly Vinyl Alcohol* (PVA). Semen PCC dan *superplasticizer* terlarut didalam air bercampur membentuk pasta semen yang berfungsi sebagai matriks sedangkan *fly ash*, *pumice*, pasir, dan PVA berfungsi sebagai filler.

*Pumice* yang digunakan didalam pembuatan SCLWAC berasal dari pulau Lombok provinsi Nusa Tenggara Barat. Ukuran maksimum *pumice* sebagai agregat kasar adalah 19 mm.

Pasir yang digunakan didalam pembuatan SCLWAC berasal dari Galunggung kabupaten Tasikmalaya. Ukuran maksimum pasir sebagai agregat halus adalah 9,6 mm.

PVA yang digunakan didalam pembuatan SCLWAC sebanyak  $0,32 \text{ kg/m}^3$  memiliki dimensi panjang 6 mm, berbentuk *chopped fiber*, berwarna kuning keputih-putihan, *specific gravity*  $1,29 \text{ g/cm}^3$ , *tensile strength* 1100 MPa, memiliki sifat tidak reaktif terhadap bahan kimia dan sedikit menyerap air. Sedangkan *fly ash* digunakan untuk menyeimbangkan viscositas dan berasal dari hasil pembakaran batu bara.

Kemudian, tipe *superplasticizer* yang digunakan pada pembuatan SCLWAC adalah *VISCOCRETE aqueous solution of modified polycarboxylate copolymers* yang memiliki *specific gravity*  $1,04 \pm 0,01 \text{ g/cc}$  dan dosis yang digunakan antara 0,8-2 % dari berat binder. Sedangkan air yang digunakan memiliki pH antara 6 dan 8.

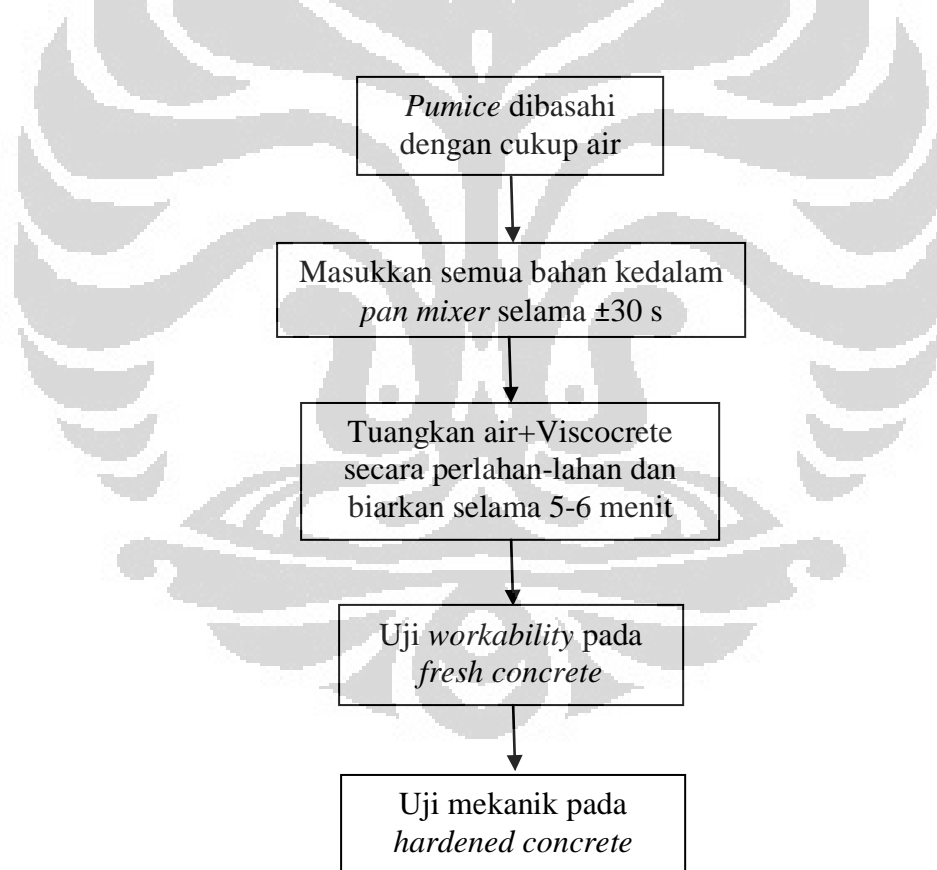
### 3.2 Preparasi Material

Pada saat preparasi dan pencampuran semuanya dilakukan pada temperatur kamar. Pembuatan sampel beton kubus membutuhkan volume 76 liter sedangkan sampel silinder membutuhkan volume 120 liter.

*Pumice* sebagai agregat ringan kasar dibasahi dengan cukup air sebelum dicampur dengan semen, pasir dan *fly ash* supaya *pumice* tidak menyerap air pada saat proses pencampuran di *pan-mixer* (N.A. Libre, et al., 2011).

Semua bahan campuran (semen, *pumice*, pasir, *fly ash*, dan atau dengan PVA) dicampur didalam *pan-mixer* selama 30 detik. Kemudian campuran air dengan *superplastizicer* dimasukkan kedalam *pan-mixer* secara perlahan-lahan. Lama pencampuran antara 5-6 menit supaya campurannya merata (P. Dinakar, et al., 2008).

Kemudian hasil pencampuran di *pan-mixer*, *fresh concrete*, dilakukan uji *workability*. Uji *workability* yang terdiri dari uji *slump flow*,  $T_{500}$  *slump flow*, VSI (ASTM C 1611), dan *V-funnel* dilakukan untuk mendapatkan proporsi campuran (*mix design*) yang memiliki sifat *self-compacting*. *Mix design* yang didapatkan dilakukan kembali uji *workability* pada *fresh concrete* dan dilakukan uji mekanik pada *hardened concrete*. Hal tersebut disajikan pada Gambar 3.2, sedangkan gambar bahan dan alat dapat dilihat pada Lampiran 5.



**Gambar 3.2 Preparasi material**



### 3.3 Pemilihan Proporsi Campuran (*Mix Design*)

Proporsi campuran didalam penelitian ini berdasarkan pada tinjauan pustaka yang telah dilakukan oleh Domone (2006a).

Kemudian dilakukan *mix-trial* pembuatan SCLWAC yang mengacu pada *mix design* Domone (2006a) sebanyak 39 (tiga puluh sembilan). *Mix-trial* dilakukan untuk mencari proporsi campuran yang memiliki sifat *self-compacting*.

Dari 39 *mix-trial* diambil 4 (empat) *mix-trial* antara lain 1 (satu) *mix-trial* yang mewakili *mix-trial* lain yang tidak memiliki sifat *self-compacting* dan 3 (tiga) *mix-trial* yang memiliki sifat *self-compacting* yang memiliki sifat *self-compacting*, kemudian dari 4 *mix-trial* dipilih 1 *mix-trial* yang memiliki kriteria sebagai berikut memiliki sifat *self-compacting*, kuat tekan terbesar dan density terkecil pada umur 28 hari daripada lainnya. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.3** Pemilihan *mix design*

### 3.4 Pengujian Beton SCLWAC

Setelah melakukan uji *workability* pada *mix design* yang didapatkan sebanyak 4 kali, beton segar (*fresh concrete*) dicor pada cetakan sebanyak 3 (tiga) kali pengulangan. Sekali pengulangan terdiri dari:

- Enam benda uji kubus 150x150x150 mm (BS-1881) digunakan untuk mengukur kuat tekan (*compressive strength*) dari beton (*hardened concrete*) pada umur 3, 7, dan 28 hari dan juga *bulk density* pada umur 28 hari.
- Tiga benda uji silinder Ø150x300 mm (ASTM C-39) digunakan untuk mengukur kuat belah (*splitting tensile strength*), mengacu pada ASTM C-496, dari beton (*hardened concrete*) pada umur 3, 7, dan 28 hari.
- Tiga benda uji silinder Ø150x300 mm (ASTM C-39) digunakan untuk mengukur modulus elastisitas, mengacu pada ACI 318, dari beton (*hardened concrete*) pada umur 3, 7, dan 28 hari dan juga *bulk density* pada umur 28 hari.

Selanjutnya 108 benda uji tersebut dibiarkan didalam cetakan selama  $\pm 24$  jam. Setelah  $\pm 24$  jam, benda uji dikeluarkan dari cetakan dan kemudian ditempatkan didalam bak air pada temperatur 22 °C dan humidity 71% selama 3, 7, dan 28 hari untuk proses *curing*. Benda uji yang sudah melalui proses *curing* pada waktu tersebut dikeluarkan dari bak air dan dibiarkan didalam laboratorium sampai benda uji menjadi kering permukaan (*saturated surface dry, SSD*). Setelah itu dilakukan pengujian kuat tekan (*compressive strength*), kuat belah (*splitting tensile strength*), dan modulus elastisitas pada mesin tekan berkapasitas 3000 kN. Laju pembebanan diseting pada 15 kN/s. Kemudian dilakukan juga pengamatan beton dalam skala mikro dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Data hasil dari uji laboratorium diolah secara statistik dan kemudian dianalisa dan dibahas. Gambar alur penelitian dapat dilihat pada Lampiran 6.

## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemilihan Material Lokal

Pemilihan material lokal dalam pembuatan *self-compacting lightweight aggregate concrete* (SCLWAC) adalah semen PCC, pasir, *pumice*, *fly ash*, *superplasticizer*, rasio air per *cementitious material* (w/cm), dan atau dengan *Poly Vinyl Alcohol* (PVA) sebanyak 0,32 kg/m<sup>3</sup>.

*Pumice* yang digunakan didalam pembuatan SCLWAC berasal dari pulau Lombok provinsi Nusa Tenggara Barat. Ukuran maksimum *pumice* sebagai agregat kasar adalah 19 mm yang memiliki *fineness modulus* 6,64, *specific gravity* 1,13 g/cm<sup>3</sup>, *loose* dan *compact bulk density* 288 dan 355 kg/m<sup>3</sup>, absorpsi 84,27% selama 24 jam, dan keausan 99,6%.

Peran *pumice* didalam pembuatan SCLWAC ini adalah sebagai pengganti agregat kasar batu split yang memiliki berat jenis SSD 2,48 g/cc sehingga densitas beton menjadi berkurang.

**Tabel 4.1. Analisa agregat kasar dan halus**

Ukuran ayakan (mm)	Pasir (% Iolos)	Pumice (% Iolos)
38	-	-
19	-	98,17
9,6	99,14	34,97
4,8	90,30	3,11
2,4	71,82	-
1,2	48,86	-
0,6	26,58	-
0,3	9,72	-
0,15	1,82	-
Fines modulus	4,52	6,64
Berat jenis SSD (g/cc)	2,47	1,13
Absorpsi 24 jam	5,76	84,57
Kadar lumpur (%)	3,13	-
Keausan (%)	-	99,60

Sedangkan pasir yang digunakan di dalam pembuatan SCLWAC berasal dari Galunggung kabupaten Tasikmalaya. Ukuran maksimum pasir sebagai agregat halus adalah 9,6 mm yang memiliki *fineness modulus* 4,52, *specific gravity* 2,47 g/cm<sup>3</sup>, absorpsi 5,76% selama 24 jam, dan kadar lumpur 3,13%. Peran pasir didalam pembuatan SCLWAC selain sebagai agregat halus juga sebagai menghambat penetrasi zat berbahaya masuk kedalam beton (Xuemei Liu, et al., 2011). Analisa agregat kasar dan halus dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Analisa komposisi kimia dari semen PCC, *fly ash*, dan *pumice* disajikan pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.2. Analisa komposisi kimia**

Senyawa oksida	Semen PCC (% berat)	Fly ash (% berat)	Pumice (% berat)
Calcium oxide (CaO)	56,95	26,05	4,31
Silica (SiO <sub>2</sub> )	22,5	38,26	59,6
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	5,75	14,87	18,36
Iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	2,85	11,27	5,2
Sulphur trioxide (SO <sub>3</sub> )	1,72	1,86	0,01
Magnesia (MgO)	3,05	3,63	1,77
Sodium oxide (Na <sub>2</sub> O)	0,32	0,55	4,51
Potassium oxide (K <sub>2</sub> O)	0,8	0,77	2,96
Titanium dioxide (TiO <sub>2</sub> )	0,26	0,82	0,8
Zinc oxide (ZnO)	0,04	-	-
Strontium oxide (SrO)	0,21	-	-
Manganese trioxide (Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,07	0,2	0,21
Phosphorus oxide (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	0,06	-	-
Chromium trioxide (Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	0,01	-	-
Loss on ignition	5,41	1,72	2,26
Free lime (CaO)	0,74	-	-
Cl <sup>-</sup>	0,01	-	-
Tricalcium silicate (C <sub>3</sub> S) / Alite*	49,71	-	-
Dicalcium silicate (C <sub>2</sub> S) / Belite*	16,01	-	-
Tricalcium aluminate (C <sub>3</sub> A) / Aluminat*	4,63	-	-
Tetracalcium aluminoferrite (C <sub>4</sub> AF) / Ferrite*	9,57	-	-

[Keterangan: \*Hasil analisa XRD lihat pada Lampiran 1]

Pada Tabel 4.2 menunjukkan bahwa semen PCC memiliki lebih banyak senyawa oksida *calcium oxide* (CaO), sedangkan *Tricalcium aluminate* (C<sub>3</sub>A)

memiliki komposisi masih dibawah 10 %berat. Hal tersebut mengindikasikan bahwa semen PCC tersebut memiliki *workability* yang baik.

*Fly ash* dan *pumice* memiliki lebih banyak senyawa oksida *silica* ( $\text{SiO}_2$ ). Senyawa oksida *silica* pada *fly ash* berkontribusi untuk proses hidrasi tambahan sehingga dapat meningkatkan kekuatan beton dan bersama dengan senyawa oksida lainnya dapat meningkatkan *workability* pada SCLWAC. Sedangkan senyawa oksida *silica* pada *pumice* menjadikan *pumice* bersifat getas.

Berdasarkan komposisi kimia pada Tabel 4.2, *fly ash* yang digunakan pada penelitian ini teridentifikasi kedalam ASTM C-618 Class-C. Hal ini mengartikan bahwa *fly ash* yang digunakan bersifat *pozzolan* dan memiliki sifat *self-cementing* apabila tercampur dengan air. Hal tersebut disajikan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3. Identifikasi *fly ash* yang digunakan**

Senyawa oksida	<i>Fly ash</i> (% berat)	ASTM C-618 (Class-C) (% berat)
<i>Calcium oxide</i> ( $\text{CaO}$ )	26,05	
<i>Silica</i> ( $\text{SiO}_2$ )	38,26	
<i>Alumina</i> ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	14,87	
<i>Iron oxide</i> ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )	11,27	
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	64,40	50 (min.)
<i>Sulphur trioxide</i> ( $\text{SO}_3$ )	1,86	5 (max.)
<i>Magnesia</i> ( $\text{MgO}$ )	3,63	
<i>Sodium oxide</i> ( $\text{Na}_2\text{O}$ )	0,55	
<i>Potassium oxide</i> ( $\text{K}_2\text{O}$ )	0,77	
Total Alkalies ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ )	1,32	1,5 (max.)
<i>Titanium dioxide</i> ( $\text{TiO}_2$ )	0,82	
<i>Zinc oxide</i> ( $\text{ZnO}$ )	-	
<i>Strontium oxide</i> ( $\text{SrO}$ )	-	
<i>Manganese trioxide</i> ( $\text{Mn}_2\text{O}_3$ )	0,2	
<i>Phosphorus oxide</i> ( $\text{P}_2\text{O}_5$ )	-	
<i>Chromium trioxide</i> ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )	-	
<i>Loss on ignition</i>	1,72	6 (max.)

#### 4.2 Pemilihan *Mix Design*

Pemilihan *mix design* berdasarkan pada sifat *workability* (tanpa ada segregasi dan *bleeding*) sesuai ASTM C-1611 (VSI 0-1), kekuatan beton

SCLWAC terbesar pada umur 28 hari dan density beton SCLWAC terkecil pada umur 28 hari.

Pada Tabel 4.4 menunjukkan *mix trial* yang dilakukan untuk mendapatkan *mix trial* dengan sifat *self-compacting*. Hasil uji *workability* (*slump flow*,  $T_{500}$ , dan VSI) mix 1 sampai 39 dapat dilihat pada Lampiran 2.

**Tabel 4.4. Susunan *mix trial* SCLWAC**

Mix	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm <sup>*)</sup> ratio	SP <sup>**)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )
1	500	50	329	768	187	0,3	7,5
2	500	50	329	768	160	0,3	7,5
3	500	26,5	250	823	155	0,3	7
4	500	25	245	823	150	0,3	6,5
5	500	26	245	823	150	0,3	6,5
6	500	25	245	823	150	0,3	7
7	500	50	329	768	154	0,3	7,5
8	500	50	329	823	154	0,3	7,5
9	500	80	329	768	162	0,3	7,5
10	500	25	329	823	147	0,3	6,3
11	500	25	329	823	147	0,3	7,5
12	500	26,5	250	823	150	0,3	6,5
13	500	31,5	250	823	150	0,3	6,5
14	500	36,5	250	823	150	0,3	6,5
15	500	41,5	250	823	150	0,3	6,5
16	500	26,5	250	823	150	0,3	6,8
17	500	26,5	250	823	150	0,3	7
18	500	26,5	250	823	150	0,3	7,3
19	500	31,5	250	823	150	0,3	7,3
20	500	31,5	110	823	150	0,3	6,5
21	500	26,5	160	823	150	0,3	6,5
22	500	26,5	250	823	150	0,3	6,5
23	500	26,5	225	823	150	0,3	6,5
24	500	26,5	200	823	150	0,3	6,5
25	500	26,5	240	823	150	0,3	6,5
26	500	26,5	245	823	150	0,3	6,5
27	500	50	329	768	149	0,3	7,5
28	500	70	329	768	154	0,3	7,5
29	500	50	329	823	147	0,3	7,5
30	500	26,5	250	823	140	0,3	6,5
31	500	46,5	250	823	150	0,3	6,5
32	500	50	329	768	143	0,3	7,5
33	500	60	329	768	146	0,3	7,5
34	500	50	329	768	138	0,3	7,5
35	500	26,5	250	823	130	0,2	7
36	500	26,5	250	823	122	0,2	6,5
37	500	26,5	250	823	110	0,2	7,1
38	500	41,5	250	823	133	0,2	6,5
39	500	26,5	250	823	150	0,3	6,5

[Keterangan: <sup>\*)</sup> w/cm: water per cementitious material, <sup>\*\*)</sup>SP: superplasticizer]

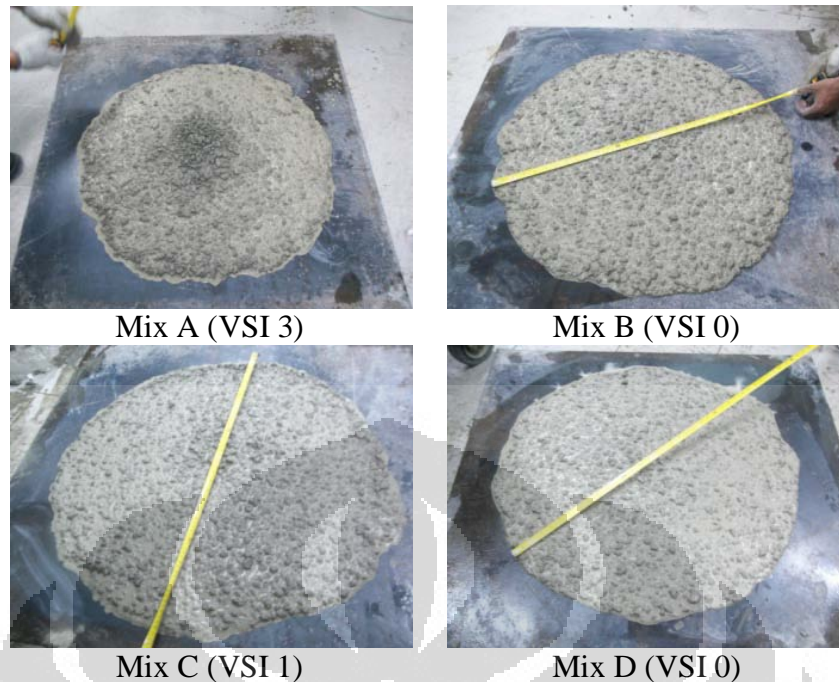
Berdasarkan Tabel 4.4 dan Lampiran 2, terdapat 4 (empat) *mix-trial* yang memenuhi sifat *self-compacting* yaitu pada mix 30, 36, 37, dan 38. Kemudian 4 *mix trial* ini akan diuji kuat tekan beton pada umur 28 hari.

Pada Tabel 4.5 menunjukkan hasil *workability* dan uji kekuatan beton SCLWAC dari mix 30, 36, 38, dan 37 yang diganti notasi mix A, B, C, dan D.

**Tabel 4.5. Pemilihan *mix design* menurut *workability*, kekuatan, dan *density***

Mix	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm ratio	Superplast icizer (kg/m <sup>3</sup> )	Slump Flow (mm)	T <sub>500</sub> (detik)	VSI	Keterangan	Kuat Tekan Beton 28 hari (MPa)	Density 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )
A	500	26,5	250	823	0,3	6,50	800	5	3	Segregasi	28	1995
B	500	26,5	250	823	0,2	6,50	765	10	0	tidak segregasi	34	2091
C	500	41,5	250	823	0,2	6,50	795	4	1	tidak segregasi	30	2095
D	500	26,5	250	823	0,2	7,11	780	12	0	tidak segregasi	35	2052

Gambar 4.1 menunjukkan pengamatan visual pada Mix A sampai Mix D. Pada Mix B dan D tidak menunjukkan adanya segregasi pada beton segar SCLWAC sedangkan pada mix A dan C menunjukkan adanya segregasi. Kekuatan mix D pada umur 28 hari menunjukkan nilai 35 MPa, lebih tinggi daripada mix lainnya, sedangkan density mix D pada umur 28 hari menunjukkan nilai 2052 kg/m<sup>3</sup>, lebih rendah daripada mix B dan mix C. Sehingga dapat disimpulkan bahwa mix D dipilih untuk dijadikan sebagai *mix design* pada penelitian ini. Kemudian, Mix D tersebut akan diuji *workability* kembali sebanyak 4 (empat) kali pada beton segar SCLWAC dan akan dicor pada cetakan sebanyak 3 (tiga) kali pengulangan proses pengecoran.



**Gambar 4.1. Pengamatan visual beton segar SCLAWC**

Pada Tabel 4.6 menyajikan perbandingan *mix design* SCLWAC dari beberapa penelitian dimana *pumice* sebagai agregat kasar. Pada penelitian ini (Mix D) menunjukkan performa kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 35 MPa dimana nilai tersebut lebih tinggi daripada nilai pada penelitian sebelumnya. Hal tersebut disebabkan karena adanya pengaruh perbedaan dari masing-masing *mix design*. Pada Mix D didalam *mix design*-nya hanya memakai *chemical admixture* satu macam saja, yaitu *polycarboxylate*, sedangkan pada penelitian sebelumnya memakai 2 macam, yaitu *polycarboxylate*, dan *air entraining agent*. Pemakaian 2 macam *chemical admixture* tersebut mengakibatkan rasio air per *cementitious material* (w/cm) lebih tinggi daripada pemakaian satu macam *chemical admixture*. Dengan tingginya nilai w/cm mengakibatkan kuat tekan beton pada umur 28 hari menjadi lebih rendah daripada nilai w/cm yang rendah. Semakin rendah nilai w/cm maka semakin berkurang ukuran porositas pada SCLWAC dan dapat meningkatkan kuat tekan beton.

Sedangkan densitas Mix D pada umur 28 hari lebih berat daripada lainnya. Namun, hal tersebut masih dikategorikan di dalam kategori beton ringan karena densitas Mix D lebih kecil daripada densitas beton biasa 2100-2500 kg/m<sup>3</sup>.



Tingginya densitas Mix D daripada mix lainnya dipengaruhi oleh komponen-komponen penyusun dari *mix design* beton SCLWAC tersebut.

**Tabel 4.6. Pebandingan *mix design* dari beberapa penelitian**

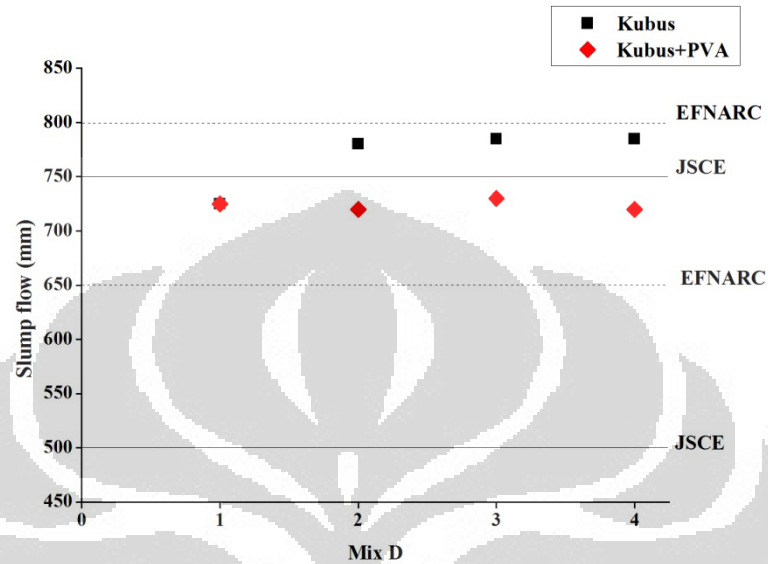
No.	<i>Mix design</i>	<i>Chemical admixture</i>	<i>Spesific gravity SSD (g/cc)</i>	w/cm	Kuat tekan 28 hari (MPa)	Density SSD 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )
1	Pada penelitian ini (Mix D)	<i>Polycarboxylate</i>	1,13	0,2	35	2052
2	Özge Andiç-Çakır, et al., (2012)	<i>Polycarboxylate &amp; Air Entraining Agent</i>	1,74	0,38	24,6	1980
3	Ilker Bekir Topçu, et al., (2010)	<i>Polycarboxylate &amp; Air Entraining Agent</i>	1,84	0,36	25	1717

#### 4.3 Beton Segar SCLWAC (*Fresh Concrete*)

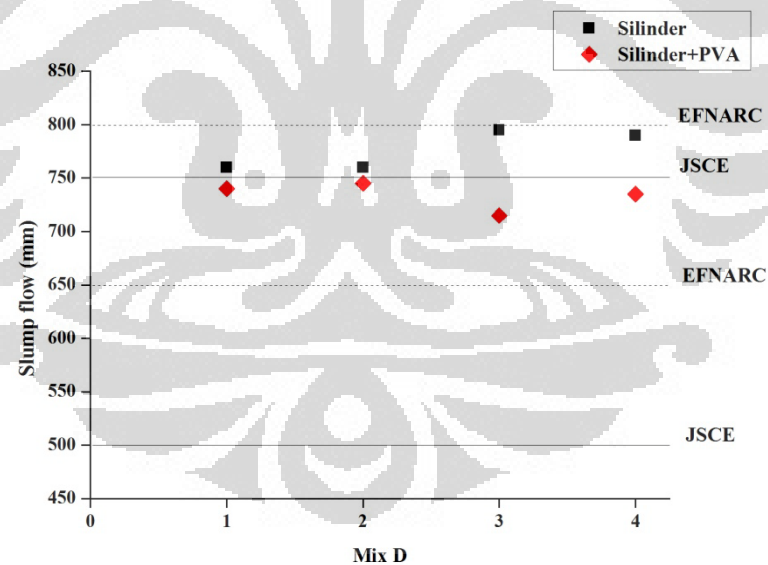
Beton segar SCLWAC dilakukan uji *workability* antara lain *slump flow*, *T<sub>500</sub> slump flow*, *VSI*, dan *V-funnel*. Pada Gambar 4.2 menunjukkan nilai *slump flow* dari beton segar Mix D yang dibandingkan dengan spesifikasi SCC dari EFNARC dan JSCE. Dilakukan empat kali pengulangan sebelum dibuat kubus dan silinder. Pada pengulangan pertama pada Gambar 4.2(a) memperlihatkan nilai *slump flow* 725 mm dimana nilai tersebut tidak melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE, sedangkan pada pengulangan kedua sampai ke-empat memperlihatkan nilai *slump flow* antara 780-785 mm dimana nilai tersebut melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE namun tidak melewati batas spesifikasi SCC dari EFNARC. Beton segar Mix D silinder (Gambar 4.2b) memiliki nilai *slump flow* antara 760-795 mm dimana nilai tersebut melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE tetapi tidak melewati batas spesifikasi SCC dari EFNARC. Hal ini mengindikasikan beton segar SCLWAC masih memiliki sifat *flowability* yang baik.

Sedangkan, apabila beton segar mix D kubus dan silinder ditambahkan fiber PVA (*Polyvinylalcohol*) sebanyak 0,32 kg/m<sup>3</sup> menunjukkan nilai *slump flow*

715-745 mm dimana nilai tersebut tidak melebihi dari batas spesifikasi SCC dari JSCE. Hal ini berarti dengan adanya penambahan fiber dapat menurunkan diameter *slump flow*.



(a)



(b)

**Gambar 4.2. *Slump flow* beton segar SCLWAC (a)kubus, (b)silinder**

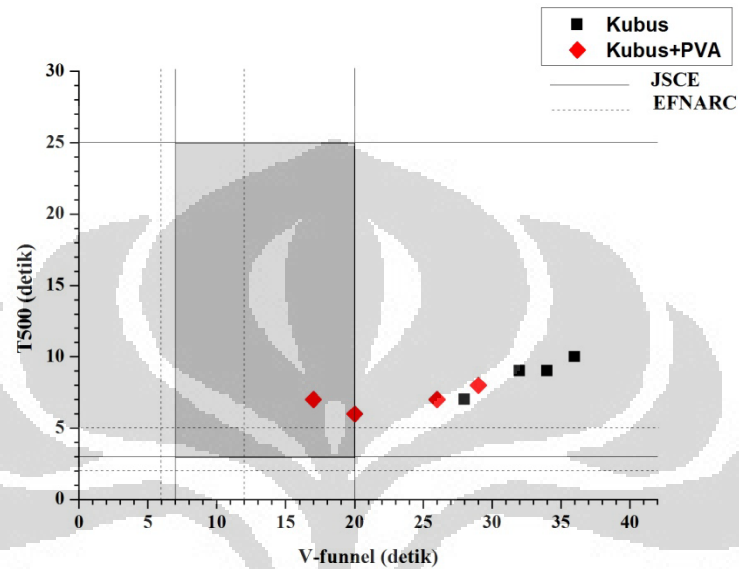
Hal yang sama juga dialami oleh H. Mazaheripour, et al. (2011), Osman Gencil, et al. (2011), D.L. Shah dan C.D. Modhere (2009), dan Bing Chen dan Juanyu Liu (2004). Hal tersebut disebabkan karena adanya pengaruh ‘*holding*’ dari fiber yang terdistribusi dalam beton segar, yang dapat mengurangi *bleeding*

dan segregasi (sedimentasi) agregat dan meningkatkan viskositas dari beton segar SCLWAC (Bing Chen, Juanyu Liu, 2004). Dengan meningkatnya viskositas maka akan menghambat aliran, *slump flow*, beton segar SCLWAC secara horisontal. Sedangkan naik turunnya nilai *slump flow* pada Gambar 4.2 karena adanya pengaruh proses pencampuran dan penempatan beton segar kedalam alat *slump flow cone*. Berdasarkan pengamatan visual, beton segar SCLWAC kubus dan silinder tanpa atau dengan fiber PVA masuk kedalam ASTM C-1611 VSI 0-1. Pengamatan visual dapat dilihat pada Lampiran 3.

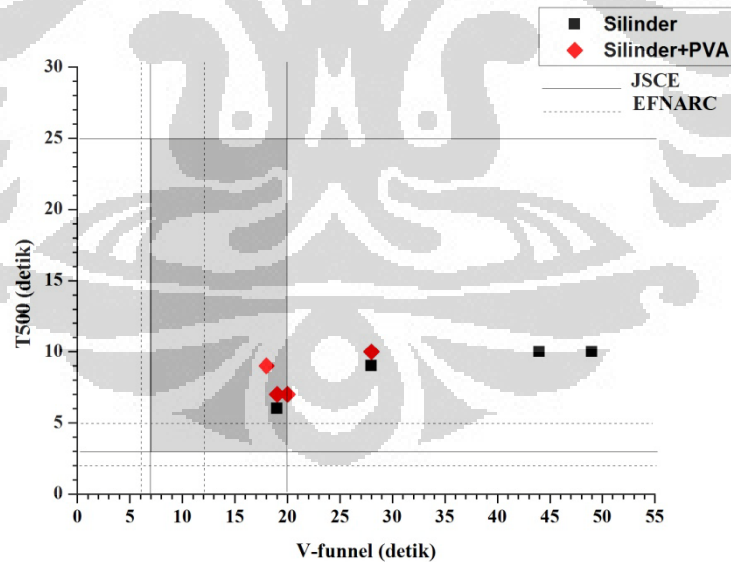
Pada Gambar 4.3 menunjukkan hubungan waktu alir untuk mencapai diameter 500 mm ( $T_{500}$ ) dan waktu alir secara vertikal (*V-funnel*) yang dibandingkan dengan spesifikasi SCC dari EFNARC dan JSCE. Dilakukan empat kali pengulangan sebelum dibuat kubus dan silinder. Pada pengulangan pertama di Gambar 4.3(b) memperlihatkan nilai  $T_{500} = 6$  detik dan *V-funnel* = 19 detik dimana nilai tersebut tidak melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE (warna abu-abu), sedangkan pada pengulangan kedua sampai ke-empat memperlihatkan nilai  $T_{500}$  antara 9-10 detik dimana nilai ini tidak melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE, sedangkan nilai *V-funnel* antara 28-49 detik dimana nilai ini melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE maupun EFNARC. Nilai  $T_{500}$  dari beton segar Mix D kubus (Gambar 4.3a) antara 7-10 detik dimana nilai tersebut melewati batas spesifikasi SCC dari EFNARC namun tidak melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE. Sedangkan nilai *V-funnel* (Gambar 4.3a) antara 28-36 detik dimana nilai ini melewati batas spesifikasi SCC dari JSCE dan EFNARC. Lamanya waktu *V-funnel* disebabkan karena adanya pengaruh gesekan antara beton segar SCLWAC dengan alat uji *V-funnel*.

Kemudian, apabila beton segar mix D kubus dan silinder (Gambar 4.3) ditambahkan fiber PVA (*Polyvinylalcohol*) sebanyak  $0,32 \text{ kg/m}^3$  menunjukkan nilai  $T_{500}$  antara 4-10 detik dan *V-funnel* antara 17-29 detik. Pada Gambar 4.3a terlihat sebanyak dua kali pengulangan yang tidak melewati batas spesifikasi JSCE (warna abu-abu) begitu juga pada Gambar 4.3b terlihat sebanyak tiga kali pengulangan yang tidak melewati batas spesifikasi JSCE. Nilai tersebut mengindikasikan bahwa waktu yang dibutuhkan untuk  $T_{500}$  dan *V-funnel* lebih cepat daripada SCLWAC tanpa fiber PVA. Hal tersebut disebabkan karena bentuk

fiber PVA berupa *chopped fiber* sepanjang 6 mm sehingga dapat mengurangi gesekan arah horisontal pada saat mencapai diameter 500 mm ( $T_{500}$  slump flow) dan mengurangi gesekan arah vertikal (*V-funnel*).



(a)



(b)

**Gambar 4.3. Hubungan waktu yang diperlukan untuk mengalir melewati *V-funnel* dan mencapai *slump flow* 500mm (a)kubus, (b)silinder**

Berbeda dengan hasil penelitian Gencil, et al. (2011), D.L. Shah dan C.D. Modhere (2009) yang memakai *steel fiber* dan *polyester fiber* didalam *self-*

*compacting concrete* (SCC). Pada penelitian mereka, pengaruh penambahan fiber pada SCC memperlambat waktu alir untuk mencapai diameter 500 mm ( $T_{500}$ ) dan waktu alir secara vertikal (V-funnel). Hal ini disebabkan karena bentuk fiber yang mereka gunakan adalah *hooked*. *Hooked* fiber ini menyebabkan efek *blocking* pada partikel-partikel selama mengalir sehingga waktu alirnya berkurang dibandingkan dengan waktu alir SCC tanpa fiber.

Meskipun beberapa pengujian beton segar (*fresh concrete*) yang telah disebutkan diatas, hanya tiga pengujian (*slump flow*,  $T_{500}$  *slump flow*, VSI) yang mungkin dipakai selama pembuatan *self-compacting concrete* (SCC). Ketiga kombinasi pengujian ini dapat memberikan informasi tentang kemampuan mengisi (*filling ability/flow ability*), kemampuan melewati (*passing ability*), dan stabilitas campuran SCC. Sehingga ketiga kombinasi pengujian ini yang akan menentukan keterimaan (*acceptability*) dari SCC.

#### **4.4 Beton Keras SCLWAC (*Hardened Concrete*)**

##### **4.4.1 Analisa Statistik**

Beton keras SCLWAC diuji sifat mekaniknya antara lain kuat tekan (*compressive strength*), kuat belah (*splitting tensile strength*), modulus elastisitas, dan densitasi.

Total benda uji sebanyak 108 terdiri dari 54 benda uji kubus diuji kuat tekan ( $f_c$ ), 27 benda uji silinder diuji kuat belah ( $f_{ct}$ ), dan 27 benda uji silinder dihitung modulus elastisitas ( $E_c$ ). Masing-masing nilai yang didapatkan pada pengujian tersebut dianalisa secara statistik untuk menghindari kesalahan yang signifikan.

Parameter-parameter statistik yang dianalisa pada penelitian ini meliputi nilai *mean* (M), standar deviasi (SD), *coefficient of variation* (COV), *standard error of mean* (SEM), *range* (R), analisa regresi linier, dan uji hipotesis *one sample t-Test*.

Analisa regresi digunakan untuk mengevaluasi hasil dari nilai-nilai yang didapatkan dari pengujian. Nilai-nilai hasil pengujian dapat digunakan apabila nilai regresi kurang dari atau sama dengan 8% terhadap nilai rata-rata pengujian. Sedangkan uji hipotesis *one sample t-Test* untuk menentukan apakah hipotesa

rata-rata berbeda secara signifikan dari nilai rata-rata sampel yang diteliti. Perhitungan secara statistik dapat dilihat pada Lampiran 4.

**Tabel 4.7 Hasil uji Kuat Tekan ( $f_c$ ) SCLWAC**

Mix D Kubus (n)	Kuat Tekan, $f_c$ Mix D (MPa)			$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) 28 days	Kuat Tekan, $f_c$ , Mix D+PVA (MPa)			$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) 28 days
	3 days	7 days	28 days		3 days	7 days	28 days	
1	23,6	27,1	32,7	2008,9	20,3	24,8	32,3	2062,2
2	23,1	29,9	42,7	1993,6	20,6	27,3	35,2	2019,8
3	24,4	28,8	51,1	2023,7	20,4	25,1	31,1	2066,2
M	23,7	28,6	42,2	2008,7	20,4	25,7	32,9	2049,4
SD	0,66	1,41	9,21	15,05	0,15	1,37	2,11	25,71
SEM	0,38	0,81	5,32	8,70	0,09	0,79	1,22	14,84
COV (%)	2,79	4,93	21,85	0,75	0,75	5,31	6,41	1,26

**Tabel 4.8. Hasil *one sample t-Test* dari uji kuat tekan ( $f_c$ ) SCLWAC**

Mix D Kubus	<i>One sample t-Test</i>				<i>One sample t-Test</i>			
	Kuat Tekan Mix D (MPa)			$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) 28 hari	Kuat Tekan Mix D+PVA (MPa)			$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) 28 hari
	3 hari	7 hari	28 hari		3 hari	7 hari	28 hari	
Null Hypothesis	$\mu = 24,4$	$\mu = 29,9$	$\mu = 51,1$	$\mu = 2023,7$	$\mu = 20,6$	$\mu = 27,3$	$\mu = 35,2$	$\mu = 2066,2$
Alternative hypothesis	$\mu < >$ 24,4	$\mu < >$ 29,9	$\mu < >$ 51,1	$\mu < >$ 2023,7	$\mu < >$ 20,6	$\mu < >$ 27,3	$\mu < >$ 35,2	$\mu < >$ 2066,2
SD	0,66	1,41	9,21	15,05	0,15	1,37	2,11	25,71
SEM	0,38	0,81	5,32	8,70	0,09	0,79	1,22	14,84
t statistic	-1,84895	-1,59616	-1,67973	-1,72238	-1,88982	-1,98789	-1,91727	-1,1317
DF (degree of freedom)	2	2	2	2	2	2	2	2
Prob> t	0,20571	0,25152	0,23502	0,22714	0,19936	0,18516	0,19524	0,3752
Interpretasi hasil (pada level 0,05)	Karena nilai Prob. lebih besar dari level 0,05 maka populasi mean dari masing-masing Mix pada setiap umur beton tidak berbeda secara signifikan dengan test mean ( $\mu$ ) dari masing-masing Mix pada setiap umur beton.							

Pada Tabel 4.7 menunjukkan nilai COV dari kuat tekan ( $f_c$ ) mix D sebesar 2,79% pada umur 3 hari, 4,93% pada umur 7 hari, dan 21,85% pada umur 28 hari. Sedangkan nilai COV dari kuat tekan ( $f_c$ ) mix D+PVA sebesar 0,75% pada umur 3 hari, 5,31% pada umur 7 hari, dan 6,41% pada umur 28 hari.

Nilai COV pada SCLWAC mix D pada umur 28 hari menunjukkan nilai lebih tinggi daripada umur 3 dan 7 hari dan juga lebih tinggi daripada mix D+PVA. Menurut F.M. Almeida Filho, et al. (2010), tingginya nilai COV ini mungkin disebabkan karena perbedaan homogenitas dan *consolidation level* dari SCLWAC yang mungkin terjadi pada sampel selama proses *casting*.

Pada Tabel 4.8 menunjukkan bahwa sejauh mana perbedaan nilai *mean* ( $M$ ) pada masing-masing pengulangan ( $n$ ) dengan menggunakan *one sample t-Test*. Hasilnya pada mix D umur 28 hari yang memiliki COV lebih tinggi menunjukkan nilai  $P > |t| = 0,23502$ . Karena nilai  $P$  lebih besar daripada *significant level* (0,05) maka populasi *mean* dari mix D umur 28 hari tidak berbeda secara signifikan dengan test mean ( $\mu$ ) dari mix D umur 28 hari. Interpretasi yang sama juga ditunjukkan pada mix D umur 3, 7 hari dan mix D+PVA umur 3, 7, 28 hari.

Pada Tabel 4.9 menunjukkan nilai COV dari kuat belah ( $f_{ct}$ ) mix D sebesar 0% pada umur 3 hari, 3,77% pada umur 7 hari, dan 6,13% pada umur 28 hari. Sedangkan nilai COV dari kuat belah ( $f_{ct}$ ) mix D+PVA sebesar 15,05% pada umur 3 hari, 25,5% pada umur 7 hari, dan 3,54% pada umur 28 hari.

Nilai COV pada SCLWAC mix D+PVA pada umur 7 hari menunjukkan nilai lebih tinggi daripada umur 3 dan 28 hari dan juga lebih tinggi daripada mix D. Hal tersebut memiliki penyebab yang sama yaitu karena perbedaan homogenitas dan *consolidation level* dari SCLWAC yang mungkin terjadi pada sampel selama proses *casting*.

Meskipun demikian, mix D+PVA umur 7 hari yang memiliki COV lebih tinggi menunjukkan nilai  $P > |t| = 0,5$  (Tabel 4.10). Karena nilai  $P$  lebih besar daripada *significant level* (0,05) maka populasi *mean* dari mix D+PVA umur 7 hari tidak berbeda secara signifikan dengan *test mean* ( $\mu$ ) dari mix D+PVA umur 7 hari. Interpretasi yang sama juga ditunjukkan pada mix D umur 3, 7, 28 hari dan mix D+PVA umur 3, 28 hari.

Jadi dapat disimpulkan bahwa meskipun masing-masing pengujian (uji kuat tekan, uji kuat belah, dan perhitungan modulus elastisitas) memiliki nilai *mean* yang berbeda-beda di setiap pengulangan ( $n$ ), perbedaan tersebut tidak signifikan terhadap masing-masing *test mean* ( $\mu$ ).

**Tabel 4.9. Hasil uji Kuat Belah ( $f_{ct}$ ) SCLWAC**

Mix D Silinder (n)	Splitting Tensile Strenght, $f_{ct}$ , Mix D (MPa)			Splitting Tensile Strenght, $f_{ct}$ , Mix D+PVA (MPa)		
	3 days	7 days	28 days	3 days	7 days	28 days
1	2,5	3,2	3,9	2,6	3,6	4,1
2	2,5	3,0	3,5	-	-	-
3	2,5	3,0	3,9	2,1	2,5	3,9
M	2,5	3,1	3,8	2,4	3,1	4,0
SD	0	0,11	0,23	0,35	0,78	0,14
SEM	0	0,07	0,23	0,25	0,55	0,10
COV (%)	0	3,77	6,13	15,05	25,5	3,54

**Tabel 4.10. Hasil uji *one sample t-Test* dari uji kuat belah ( $f_{ct}$ ) SCLWAC**

Mix D Silinder	<i>One sample t-Test</i> Kuat Belah Mix D (MPa)			<i>One sample t-Test</i> Kuat Belah Mix D+PVA (MPa)		
	3 hari	7 hari	28 hari	3 hari	7 hari	28 hari
Null Hypothesis	-	$\mu = 3,2$	$\mu = 3,9$	$\mu = 2,6$	$\mu = 3,6$	$\mu = 4,1$
Alternative hypothesis	-	$\mu <> 3,2$	$\mu <> 3,9$	$\mu <> 2,6$	$\mu <> 3,6$	$\mu <> 4,1$
SD	-	0,11	0,23	0,35	0,78	0,14
SEM	-	0,07	0,23	0,25	0,55	0,10
t statistic	-	-2	-1	-1	-1	-1
DF (degree of freedom)	-	2	2	1	1	1
Prob> t	-	0,1835	0,42265	0,5	0,5	0,5
Interpretasi hasil (pada level 0,05)	Karena nilai Prob. lebih besar dari level 0,05 maka populasi mean dari masing-masing Mix pada setiap umur beton tidak berbeda secara signifikan dengan test mean ( $\mu$ ) dari masing-masing Mix pada setiap umur beton.					

Pada Tabel 4.11 menunjukkan hasil perhitungan modulus elastisitas ( $E_c$ ) mix D dan mix D+PVA. Sedangkan perhitungan statistik masing-masing komponennya (kuat tekan, dan densitasnya) dapat dilihat pada Lampiran 4.

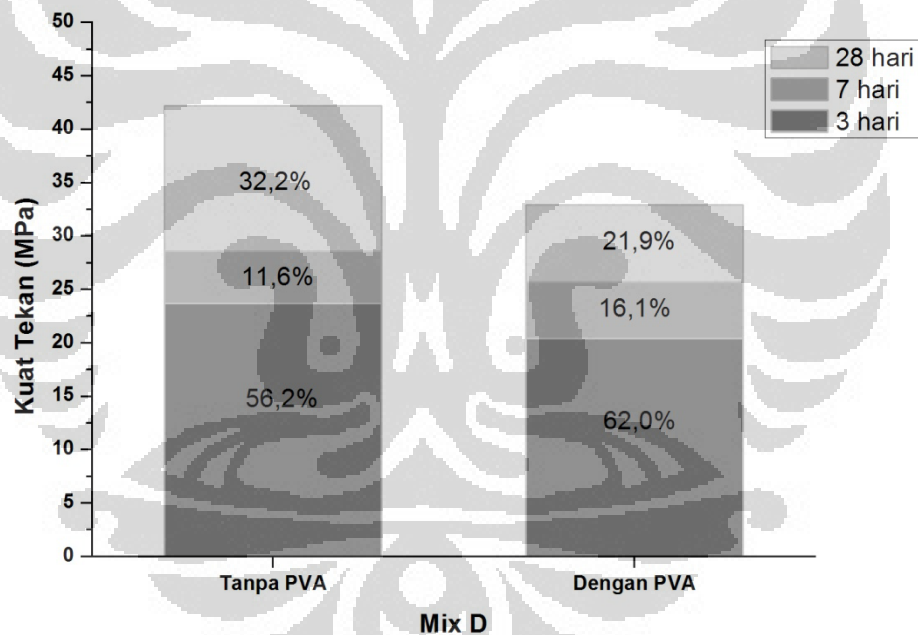


**Tabel 4.11. Hasil perhitungan modulus elastisitas ( $E_c$ )**

	Mix D Silinder			Mix D Silinder+PVA		
	3 hari	7 hari	28 hari	3 hari	7 hari	28 hari
Kuat Tekan, $f_c$ , (psi)	1305,3	1755,0	2364,1	1813,0	1958,0	2262,6
Density (lb/ft <sup>3</sup> )	149,6	150,5	150,1	147,9	150,9	149,8
Modulus Elastisiti (psi)	2182607,2	2553190,7	2949369,0	2528536,0	2706748,3	2876595,7
Modulus Elastisiti (GPa)	15,0	17,6	20,0	17,4	18,7	20

4.4.2 Analisa kuat tekan (*compressive strength*)

Hasil uji kuat tekan pada SCLWAC mix D tanpa mikrofiber PVA (*polyvinylalcohol*) dan dengan mikrofiber PVA dimana *pumice* sebagai agregat kasarnya (*coarse aggregate*) dan rasio w/cm sebesar 0,2 selama 3, 7, dan 28 hari ditunjukkan pada Gambar 4.4.



**Gambar 4.4 Kuat tekan SCLWAC tanpa PVA dan dengan PVA**

Seperti ditunjukkan didalam gambar tersebut, kuat tekan beton SCLWAC mix D tanpa mikrofiber fiber PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari sebesar 23,7 MPa; 28,6 MPa; dan 42,2 MPa. Sedangkan kuat tekan beton SCLWAC mix D dengan mikrofiber PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari sebesar 20,4 MPa; 25,7 MPa; dan 32,9 MPa.

Kuat tekan pada semua benda uji SCLWAC meningkat dengan bertambahnya umur beton. Pertumbuhan kuat tekan beton SCLWAC tanpa PVA dari umur 0 sampai 3 hari sebesar 56,2%, umur 3 hari sampai 7 hari sebesar 11,6%, dan umur 7 hari sampai 28 hari sebesar 32,2%. Sedangkan kuat tekan beton SCLWAC dengan mikrofiber PVA dari umur 0 sampai 3 hari sebesar 62%, umur 3 hari sampai 7 hari sebesar 16,1%, dan umur 7 hari sampai 28 hari sebesar 21,9%. Hal ini mengartikan bahwa pertumbuhan kuat tekan SCLWAC tanpa PVA menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan SCLWAC dengan PVA.

Adanya penambahan mikrofiber PVA kedalam SCLWAC, kuat tekan beton SCLWAC dengan mikrofiber PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari berkurang 13,9%; 10,1%; dan 22% dari SCLWAC tanpa PVA. Penurunan tersebut kemungkinan disebabkan karena mikrofiber PVA sebanyak 0,32 kg/m<sup>3</sup> belum mencapai fraksi berat minimum sehingga belum memberikan dampak terhadap peningkatan kuat tekan beton SCLWAC.

Mekanisme kegagalan beton tersebut dimulai dengan adanya *microcracks* didalam *Interfacial Transition Zone* (ITZ) antara matriks semen dengan agregat yang kemudian menjalar (*propagation*) pada saat pembebanan ditingkatkan. Namun, pada SCLWAC tidak ditemukan adanya ITZ sehingga kuat tekan beton SCLWAC tersebut berasal dari *interconnection* antara matriks semen dengan LWA *pumice*. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.7. Kekuatan SCLWAC tersebut dapat menurun jika mikrofiber PVA didalam SCLWAC tidak terdistribusi dengan merata. Menurut S.P. Shah (2010), daerah yang miskin fiber akan membentuk seperti celah kecil, dimana celah tersebut dapat memicu kegagalan awal.

Hasil yang sama juga ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Sameer Hamoush, Taher Abu-Lebdeh, dan Toney Cummins (2010) dimana *limestone* sebagai agregat kasarnya dan mikrofiber PVA sebagai fiber didalam beton biasa. Hasilnya menunjukkan bahwa adanya penambahan mikrofiber PVA sebanyak 3% dari berat semen didalam beton biasa, nilai kuat tekan beton tersebut menjadi turun, dan nilai regangan dari beton tersebut menjadi naik.

Sedangkan densitas SCLWAC pada umur 28 hari (Tabel 4.7) dengan penambahan fiber PVA lebih besar dibandingkan dengan densitas SCLWAC tanpa fiber PVA. Umumnya dengan bertambahnya densitas maka bertambah pula

kuat tekan beton, akan tetapi penambahan fiber PVA kedalam SCLWAC hanya menambah beratnya saja tanpa ada penambahan kuat tekannya.

#### 4.4.3 Analisa kuat belah (*splitting tensile strength*)

*Splitting tensile strength,  $f_{ct}$* , dihitung sebagai berikut (J.K. Wight, & J.G. MacGregor, 2012):

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld}$$

Dimana:  $f_{ct}$  = kuat belah (MPa)

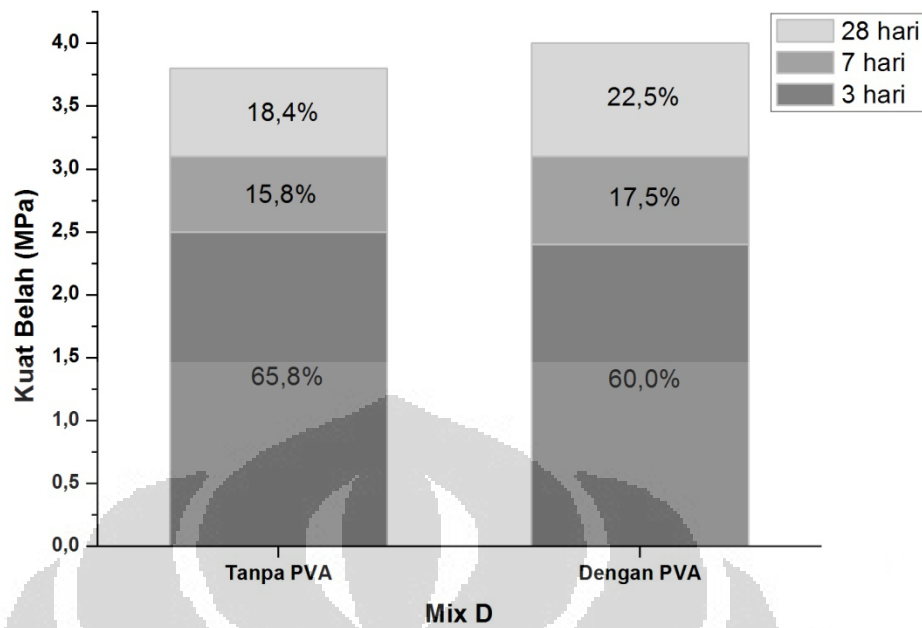
P = beban maksimum (N)

l = panjang spesimen (mm)

d = diameter spesimen (mm)

Hasil uji kuat belah pada SCLWAC mix D tanpa mikrofiber PVA (*polyvinylalcohol*) dan dengan mikrofiber PVA dimana *pumice* sebagai agregat kasarnya (*coarse aggregate*) dan rasio w/cm sebesar 0,2 selama 3, 7, dan 28 hari ditunjukkan pada Gambar 4.5.

Seperti ditunjukkan didalam gambar tersebut, kuat belah beton SCLWAC mix D tanpa mikrofiber PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari sebesar 2,5 MPa; 3,1 MPa; dan 3,8 MPa. Sedangkan kuat belah beton SCLWAC mix D dengan mikrofiber PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari sebesar 2,4 MPa; 3,1 MPa; dan 4,0 MPa. Rendahnya kuat belah SCLWAC disebabkan karena lemahnya *interconnection* antara matriks semen dengan LWA *pumice* ketika menerima beban tarik.



**Gambar 4.5. Kuat belah SCLWAC tanpa PVA dan dengan PVA**

Kuat belah pada semua benda uji SCLWAC meningkat dengan bertambahnya umur beton. Pertumbuhan kuat belah beton SCLWAC tanpa PVA dari umur 0 sampai 3 hari sebesar 65,8%, umur 3 hari sampai 7 hari sebesar 15,8%, dan umur 7 hari sampai 28 hari sebesar 18,4%. Sedangkan kuat belah beton SCLWAC dengan mikrofiber PVA dari umur 0 sampai 3 hari sebesar 60%, umur 3 hari sampai 7 hari sebesar 17,5%, dan umur 7 hari sampai 28 hari sebesar 22,5%. Hal ini mengartikan bahwa pertumbuhan kuat belah SCLWAC dengan PVA menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan SCLWAC tanpa PVA.

Adanya penambahan mikrofiber PVA didalam SCLWAC memperlihatkan peningkatan kuat belah beton tersebut pada umur 28 hari sebesar 5,2% dari SCLWAC tanpa PVA. Pada penelitian sebelumnya juga memperlihatkan bahwa penambahan sejumlah fiber baik *steel* fiber maupun *polypropylene* fiber didalam beton dapat meningkatkan kuat belah (*splitting tensile strength*) SCC. Menurut Sameer Hamoush, et al. (2010), Osman Gencil, et al. (2011) & H. Mazaheripour, et al. (2011), hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh beban yang bekerja pada beton ditransferkan ke fiber yang telah membentuk ikatan unik dengan matriks semen, sehingga dapat mencegah propagasi dari *microcracks* dan secara substansi meningkatkan kuat belah (*splitting tensile strength*) dari beton.

#### 4.4.4 Analisa modulus elastisitas

Modulus elastisitas statis merupakan hubungan antara akar dari tegangan tekan, seperti pada persamaan dari ACI 318 *building code* yang ditunjukkan dibawah ini:

$$E_c = 33(w^{1,5})\sqrt{f'_c} \text{ psi.}$$

Dimana:  $E_c$  = Modulus elastisitas (psi)

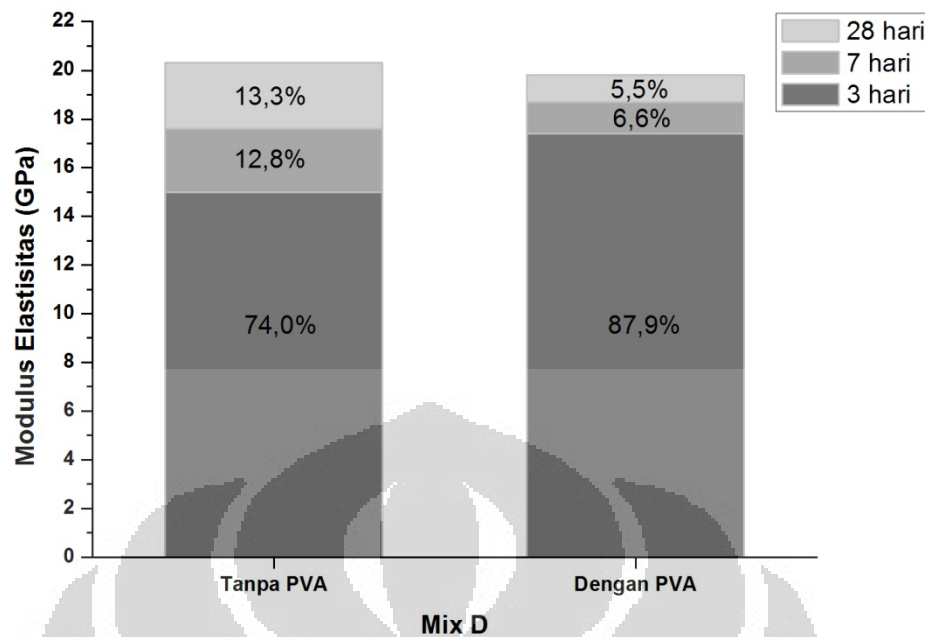
$w$  = densitas (lb/ft<sup>3</sup>)

$f'_c$  = kuat tekan maksimum (psi)

Hasil perhitungan modulus elastisitas pada SCLWAC mix D tanpa mikrofiber PVA (*polyvinylalcohol*) dan dengan mikrofiber PVA dimana *pumice* sebagai agregat kasarnya (*coarse aggregate*) dan rasio w/cm sebesar 0,2 selama 3, 7, dan 28 hari ditunjukkan pada Gambar 4.6.

Seperti ditunjukkan didalam gambar tersebut, modulus elastisitas SCLWAC mix D tanpa mikrofiber PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari sebesar 15 GPa; 17,6 GPa; dan 20,3 GPa. Sedangkan modulus elastisitas beton SCLWAC mix D dengan mikrofiber PVA pada umur 3, 7, dan 28 hari sebesar 17,4 GPa; 18,7 GPa; dan 19,8 GPa.

Modulus elastisitas pada semua benda uji SCLWAC meningkat dengan bertambahnya umur beton. Pertumbuhan modulus elastisitas beton SCLWAC mix D tanpa PVA dari umur 0 sampai 3 hari sebesar 74,0%, umur 3 hari sampai 7 hari sebesar 12,8%, dan umur 7 hari sampai 28 hari sebesar 13,3%. Sedangkan modulus elastisitas beton SCLWAC mix D dengan mikrofiber PVA dari umur 0 sampai 3 hari sebesar 87,9%, umur 3 hari sampai 7 hari sebesar 6,6%, dan umur 7 hari sampai 28 hari sebesar 5,5%. Hal ini mengartikan bahwa pertumbuhan modulus elastisitas SCLWAC mix D tanpa PVA menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan SCLWAC mix D dengan PVA.



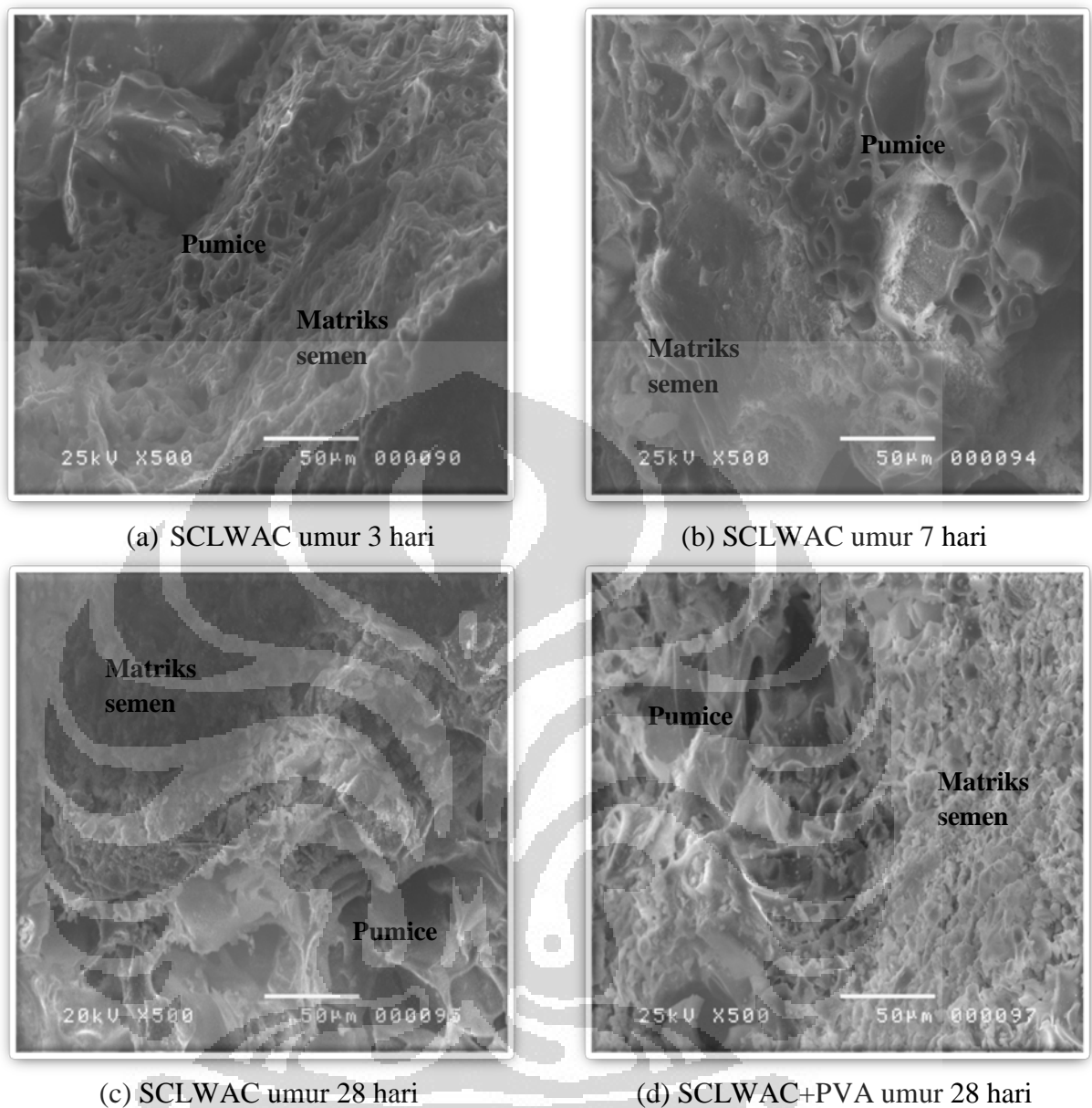
**Gambar 4.6. Modulus elastisitas SCLWAC tanpa PVA dan dengan PVA**

Adanya penambahan mikrofiber PVA didalam SCLWAC memperlihatkan penurunan modulus elastisitas tersebut pada umur 28 hari sebesar 2,5% dari SCLWAC tanpa PVA. Penurunan ini kemungkinan disebabkan karena mikrofiber PVA sebanyak  $0,32 \text{ kg/m}^3$  belum mencapai fraksi berat minimum sehingga belum memberikan dampak terhadap peningkatan modulus elastisitas SCLWAC.

Hasil yang sama juga ditunjukkan pada penelitian yang dilakukan oleh Valeria Corinaldesi, Giacomo Moriconi (2011) dimana *limestone powder* dan *recycle concrete powder* sebagai *mineral addition* dan PVA sebanyak  $10 \text{ kg/m}^3$  sebagai fiber didalam SCC. Hasilnya juga menunjukkan bahwa adanya penambahan PVA, modulus elastisitasnya menurun, hal ini disebabkan karena rendahnya konten fiber yang digunakan.

#### 4.4.5 Scanning electron microscope (SEM)

Sampel untuk pemeriksaan SEM diambil saat umur beton 3, 7, dan 28 hari kemudian dipecah menjadi potongan kecil dan diimmersikan didalam acetone untuk menghentikan proses hidrasi semen. Sampel kemudian dicoating emas untuk analisa SEM. Pembesaran SEM diset pada pembesaran  $\times 500$ .



**Gambar 4.7. Pengamatan SCLWAC menggunakan SEM**

Pada Gambar 4.7 menunjukkan pengamatan SCLWAC menggunakan SEM. Pada gambar tersebut, *pumice* memiliki tekstur permukaan yang porous sedangkan matriks hidrasi semen memiliki tekstur permukaan yang padat. Di Gambar 4.7a-d terlihat adanya perbedaan matriks hidrasi semen SCLWAC pada umur 3, 7, 28 hari dan SCLWAC+PVA pada umur 28 hari. Pada Gambar 4.7a-b tidak begitu terlihat perbedaannya dibandingkan Gambar 4.7c. Perbedaannya yaitu pada Gambar 4.7c terlihat bahwa agregat pumice hampir tertutup oleh matriks hidrasi semen. Sedangkan pada Gambar 4.7d juga menunjukkan agregat

pumice hampir tertutup oleh matriks hidrasi semen namun matriks hidrasi semennya terlihat kurang padat dibandingkan dengan matriks hidrasi semen pada Gambar 4.7c. Hal tersebut kemungkinan disebabkan karena interaksi antara matriks hidrasi semen dengan fiber PVA.

*Pumice* memiliki sifat yang rapuh dan tekstur permukaan yang *porous*. Karena tekstur permukaan yang *porous* menjadikan *interconnection* matriks semen dengan agregat *pumice* meningkat. Adanya *interconnection* yang kuat ini sehingga meningkatkan hidrasi matriks semen atau mortar pada agregat pumice (Ilker Bekir Topcu, Tayfun Uygunog̃lu, 2010).

Menurut Xuemei Liu, Kok Seng Chia, Min-Hong Zhang (2011), air yang berada didalam LWA *pumice* berperan sebagai *internal water curing*, sehingga tingkat hidrasi matriks semen didalam beton ini kemungkinan meningkat. Peningkatan hidrasi matriks semen akan mengurangi *capillary porosity* dan meningkatkan *tortuosity porosity* didalam pasta semen yang kemungkinan juga mengurangi absorpsi dari SCLWAC meskipun *pumice* memiliki tekstur permukaan yang *porous*. Jadi dapat disimpulkan bahwa dengan adanya *interconnection* antara matriks semen dengan LWA *pumice* dan peningkatan tingkat hidrasi matriks semen disekitar LWA *pumice* menyebabkan kuat tekan beton SCLWAC menjadi tinggi.

Pada Gambar 4.7d menunjukkan matriks semen yang kurang padat menutupi hampir seluruh permukaan LWA *pumice*. Dengan adanya mikrofiber PVA yang memiliki sifat polaritas tinggi menyebabkan adanya ikatan yang unik antara mikrofiber dengan *cementitious material* yang memiliki sifat agak polar sehingga menjadikan matriks semen kurang padat dan hampir menutupi seluruh permukaan LWA *pumice*. Sehingga kuat belah SCLWAC+PVA pada umur 28 hari meningkat dibandingkan kuat belah SCLWAC tanpa PVA pada umur yang sama, dan modulus elastisitas SCLWAC+PVA pada umur 28 hari menurun dibandingkan dengan modulus elastisitas SCLWAC tanpa PVA pada umur yang sama.



## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil yang disajikan dan dibahas, kesimpulan yang dapat ditarik sebagai berikut:

1. *Lighthweight agregat pumice* telah berhasil dimanfaatkan didalam produksi *self-compacting lighthweight aggregate concrete* (SCLWAC) sebagai agregat kasar pengganti batu split dengan didapatkannya *mix design* Mix D.
2. Beton segar (*fresh concrete*) Mix D dan Mix D+PVA tidak menunjukkan adanya segregasi dan *bleeding* pada saat dilakukan uji *workability*.
3. Bila dibandingkan dengan beton biasa yang memiliki densitas 2100-2400 kg/m<sup>3</sup>, *Lighthweight agregat pumice* mampu mereduksi densitas beton pada umur 28 hari sebesar 2008,7 kg/m<sup>3</sup> dan mampu memiliki kuat tekan (*compressive strength*) pada umur 28 hari sebesar 42,2 MPa. Sehingga SCLWAC pada Mix D memiliki berat yang ringan namun kuat.
4. Dengan adanya penambahan mikrofiber *polyvinylalcohol* (PVA) didalam Mix D sebesar 0,32 kg/m<sup>3</sup> memberikan dampak penurunan pada kuat tekan, dan modulus elastisitasnya. Namun, adanya penambahan mikrofiber PVA 0,32 kg/m<sup>3</sup> memberikan dampak kenaikan pada kuat belah (*splitting tensile strength*).
5. Rintangan dalam pembuatan SCLWAC-*pumice* adalah proses produksinya membutuhkan biaya mahal jika kekuatan beton yang dihasilkan rendah, dan *plant control* harus dilakukan dengan lebih baik.

Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk mengoptimalkan proporsi campuran (*mix design*) SCLWAC-*pumice* dan menguji SCLWAC-*pumice* terhadap propertis lainnya seperti ketahanan terhadap beban gempa, ketahanan terhadap api, konduktivitas termal, penyusutan (*shrinkage*), dll.

## DAFTAR REFERENSI

ACI 318. (2005). Building Code Requirements for Structural Concrete. *American Concrete Institute*.

Andiç-Çakır, Ö., & Hizal, S. (2012). Influence of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of self consolidating lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 34, 575-583.

ASTM C 39. (2003). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society of Testing and Materials Standards*.

ASTM C 496. (2004). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. *American Society of Testing and Materials Standards*.

ASTM C 618. (2012). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. *American Society of Testing and Materials Standards*.

B. Chen, & J. Liu, (2005). Contribution of hybrid fibers on the properties of the high-strength lightweight concrete having good workability. *Cement and Concrete Research*, 35, 913-917.

Bailey, J.D. (2005, August 8). *An evaluation of the use of self consolidating concrete (scc) for drilled shaft applications*. A Thesis Submitted to The Graduate Faculty of Auburn University In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science.

BAPPENAS (2009, January 30). *Pertambangan dan energi*. April 4, 2012. <http://www.bappenas.go.id/get-file-server/node/5919/html>

Boukendakdji, O., Kadri, El-Hadj, & Kenai, S. (2012). Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete. *Cement & Concrete Composite*, 34, 583-590.

BS-1881. (1983). Method for making test cubes from fresh concrete. *British Standards Institution*.

Bullard, J.W., Jennings, H.M., Livingston, R.A., Nonat, A., Scherer, G.W., Schweitzer, J.S., Scrivener, K.L., Thomas, J.J. (2011). Mechanisms of cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 41, 1208-1223.

- Chandra, S., & Berntsson, L. (2002). *Lightweight aggregate concrete - Science, Technology, and Application*. Norwich, New York: Noyes Publication.
- Corinaldesi, V., Moriconi, G. (2011). Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions. *Cement & Concrete Composite*, 33, 596-601.
- Dinakar, P., Babu, K.G., & Santhanam M. (2008). Durability properties of high volume fly ash self compacting concretes. *Cement & Concrete Composites*, 30, 880–886.
- Domone, P.L. (2006). Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement & Concrete Composites*, 28, 197-208.
- EFNARC. (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*. Norflok: Brian Poulson.
- Feys, D., Verhoeven, R., & De Schutter, G. (2009). Why is fresh self-compacting concrete shear thickening?. *Cement and Concrete Research*, 39, 510-523.
- Filho, F.M.A., Barragán, B.E., Casas, J.R., El Debs, A.L.H.C. (2010). Hardened properties of self-compacting concrete — A statistical approach. *Construction and Building Materials*. 24, 1608-1615.
- Gencil, O., Brostowb, W., Datashvili, T., & Thedford, M. (2011). Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash. *Composite Interfaces*, 18, 169-184.
- Grace. (2005). Test method for self-consolidating concrete. *Technical Bulletin TB-1506*. USA: W. R. Grace & Co.-Conn.
- Grasser, K., & Minke, G. (1990). *Building with pumice*. Eschborn: Deutsche Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Hamoush, S., Abu-Lebdeh, T., Cummins, T. (2010). Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers. *Construction and Building Materials*. 24, 2285-2293.
- Hossain, K.M.A. (2008). Bond characteristics of plain and deformed bars in lightweight pumice concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 1491-1499.
- Koehler, E.P., & Fowler, D.W. (2007, March). *Aggregates in self-consolidating concrete*. Research Report ICAR 108-2F. The University of Texas. Austin.

Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P., & Ryle, R. (2003). Cementitious addition. Di John Newman & Ban Sheng Choo (Ed.). *Advanced concrete technology-Constituent Materials* (hal. 3/6). Oxford: Elsevier.

Libre, N.A., Shekarchi M., Mahoutian, M., & Soroushian, P. (2011). Mechanical properties of hybrid fiber reinforced lightweight aggregate concrete made with natural pumice. *Construction and Building Materials*, 25, 2458–2464.

Lura, P., Bentz, D.P., Lange, D.A., Kovler, K., Bentur, A. (2004, March). *Pumice aggregates for internal water curing*. Paper presented the meeting of the International RILEM Symposium, Evanston, IL.

Mazaheripour, H., Ghanbarpour, S., Mirmoradi, S.H., & Hosseinpour, I. (2011). The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 351–358.

Moir, G. (2003). Cements. Di John Newman & Ban Sheng Choo (Ed.). *Advanced concrete technology-Constituent Materials* (hal. 1/5-1/6). Oxford: Elsevier.

Moir, G. (2003). Cements. Di John Newman & Ban Sheng Choo (Ed.). *Advanced concrete technology-Constituent Materials* (hal. 1/15). Oxford: Elsevier.

Moir, G. (2003). Cements. Di John Newman & Ban Sheng Choo (Ed.). *Advanced concrete technology-Constituent Materials* (hal. 1/15-1/17). Oxford: Elsevier.

Newman, John & Owens, Phil. (2003). Properties of lightweight concrete. Di John Newman & Ban Sheng Choo (Ed.). *Advanced concrete technology-Concrete Properties* (hal. 2/3). Oxford: Elsevier.

Newman, John & Owens, Phil. (2003). Properties of lightweight concrete. Di John Newman & Ban Sheng Choo (Ed.). *Advanced concrete technology-Concrete Properties* (hal. 2/9). Oxford: Elsevier.

Shah, D.L. & Modhere, C.D. (2009). Parameter-study on the influence of steel and polyester fibers in the self-compacting concrete. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 2.

Shah, S.P. (2010). Controlling properties of concrete through nanotechnology. Di van Zijl & Boshoff (Ed.). *Advances in Cement-Based Materials* (hal. 5). , London: Taylor & Francis Group.

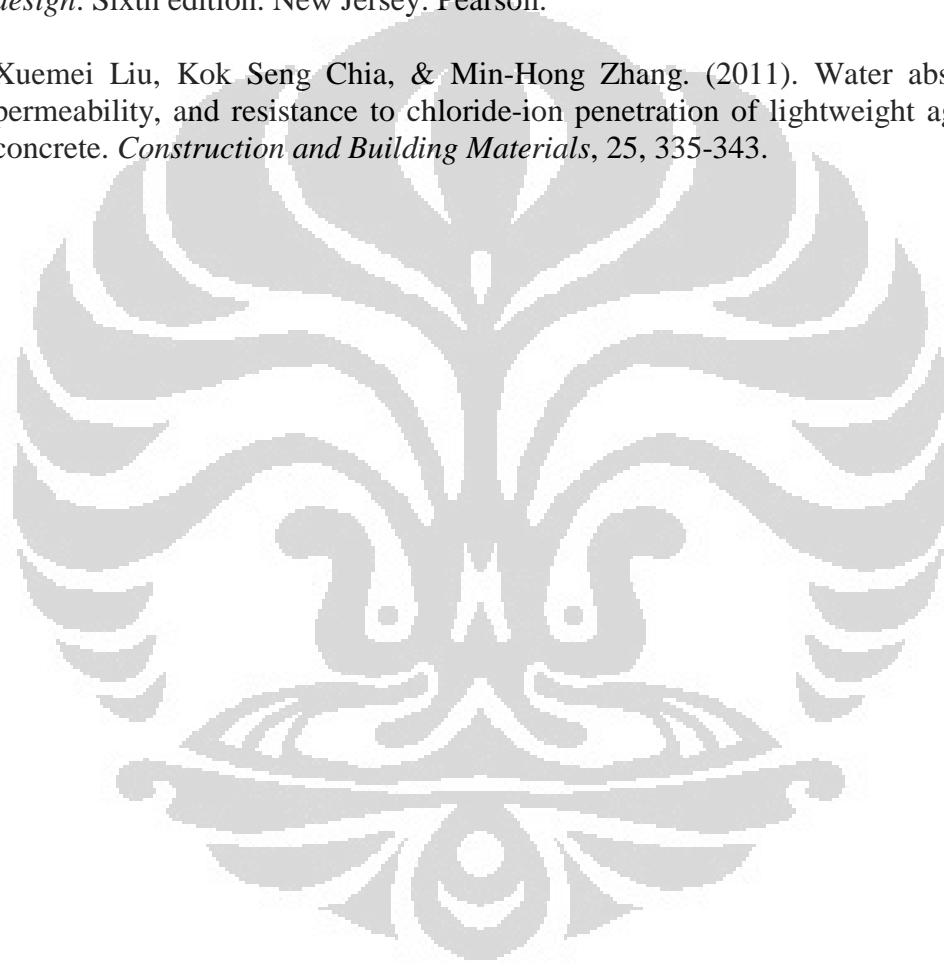
Topcu, I.B., & Uygunoglu, T. (2010). Effect of aggregate type on properties of hardened self-consolidating lightweight concrete (SCLC). *Construction and Building Materials*. 24, 1286-1295.

United State Geological Survey-USGS (2003, Mei 13). *Ring of Fire, Plate Tectonics, Sea-Floor Spreading, Subduction Zones, Hot Spots*. February 6, 2012 [http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/PlateTectonics/description\\_plate\\_tectonics.html](http://vulcan.wr.usgs.gov/Glossary/PlateTectonics/description_plate_tectonics.html)

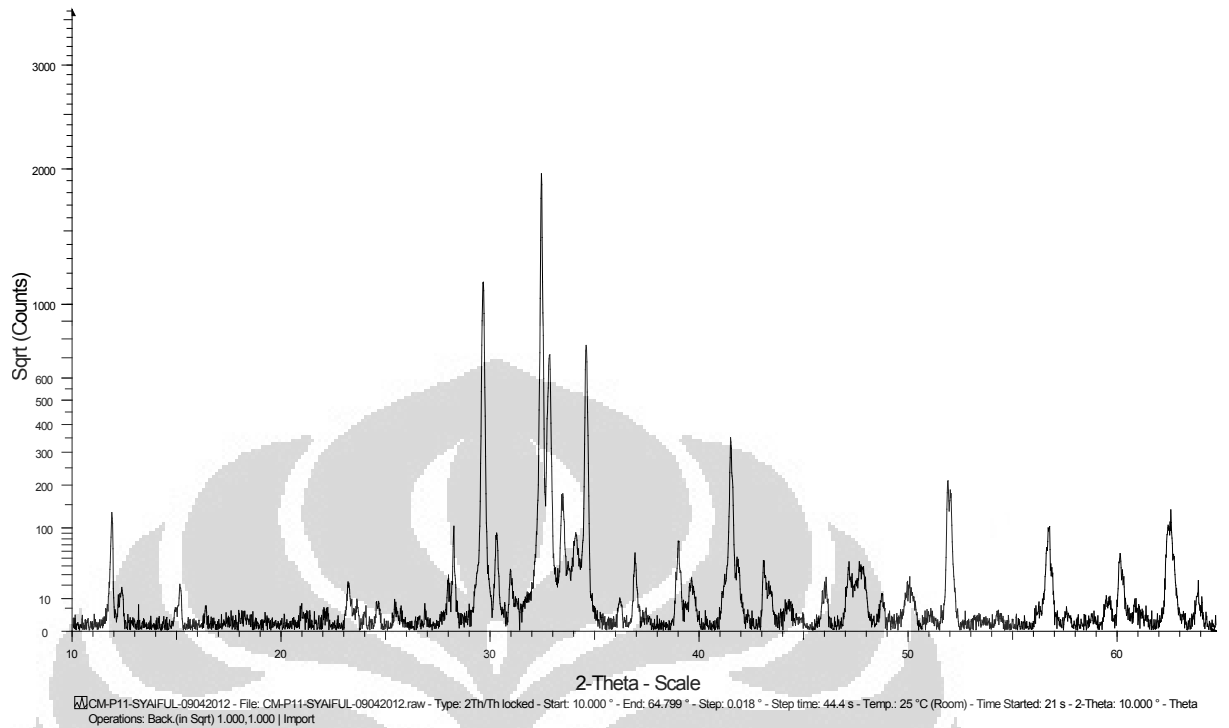
Utsi, Sofia. (2008, Oktober). *Aggregate and micro mortar optimization applied on self-compacting concrete containing fly ash*. Doctoral thesis 2008:49. Division of Structural Engineering Department of Civil, Mining & Environmental Engineering Luleå University of Technology, Sweden.

Wight, J.K., & MacGregor, J.G. (2012). *Reinforced concrete mechanics and design*. Sixth edition. New Jersey: Pearson.

Xuemei Liu, Kok Seng Chia, & Min-Hong Zhang. (2011). Water absorption, permeability, and resistance to chloride-ion penetration of lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 335-343.



## Lampiran 1 : Analisa XRD (X-ray diffraction)

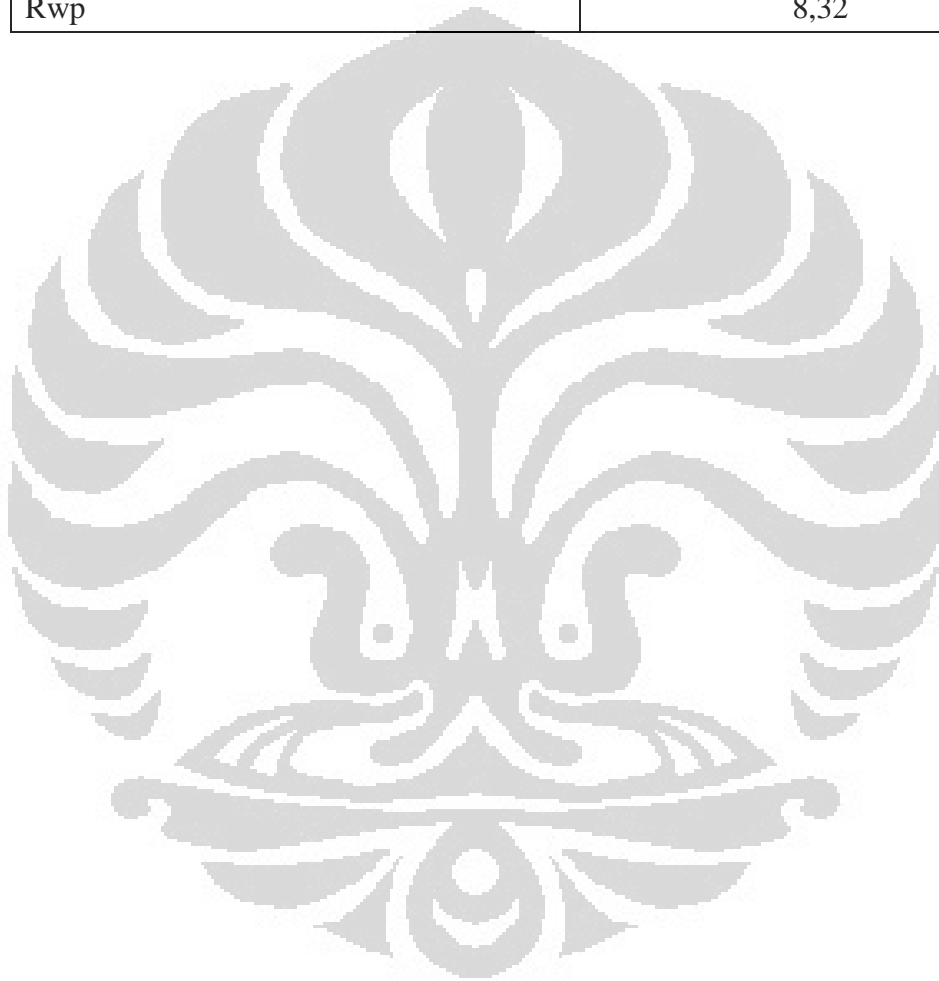


Gambar Analisa XRD Semen PCC  
Tabel Komposisi Kimia dari Analisa XRD

Senyawa Oksida	%berat
<i>Tricalcium silicate (C<sub>3</sub>S) / Alite</i>	49,72
<i>Dicalcium silicate (C<sub>2</sub>S) / Belite</i>	16,01
<i>Tricalcium aluminate (C<sub>3</sub>A) cubic / aluminate</i>	4,34
<i>Tricalcium aluminate (C<sub>3</sub>A) ortho / aluminate</i>	0,29
<i>Tetracalcium aluminoferrite (C<sub>4</sub>AF) / ferrite</i>	9,57
<i>Free lime (CaO)</i>	0,1
<i>Magnesia (MgO) / periclase</i>	1,48
<i>Gypsum (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O)</i>	1,23
<i>Hemihydrate (CaSO<sub>4</sub>1.5-0.5H<sub>2</sub>O)</i>	0,62
<i>Anhydrite (CaSO<sub>4</sub>)</i>	0,05
<i>Calcite (CaCO<sub>3</sub>)</i>	7,41
<i>Dolomite (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)</i>	0,54
<i>Albite (NaAl-Si<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)</i>	1,45
<i>Labradorite</i>	0,00
<i>Anorthite (KAl-Si<sub>3</sub>O<sub>8</sub>)</i>	0,24

Lampiran 1 : (lanjutan)

<i>Microcline</i> (KAl-Si <sub>3</sub> O <sub>8</sub> )	0,64
<i>Quartz</i> (SiO <sub>2</sub> )	0,23
<i>Cristo-low</i> (SiO <sub>2</sub> )	0,02
<i>Kaolinite</i> (Al <sub>2</sub> (Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (OH) <sub>4</sub> )	0,17
<i>Montmorill</i> (AlSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH) <sub>2</sub> )	1,97
<i>Portlandite</i> (Ca(OH) <sub>2</sub> )	0,23
<i>Thaumasite</i>	0,00
<i>Tobermorite</i>	3,71
Total	100,01
Rwp	8,32

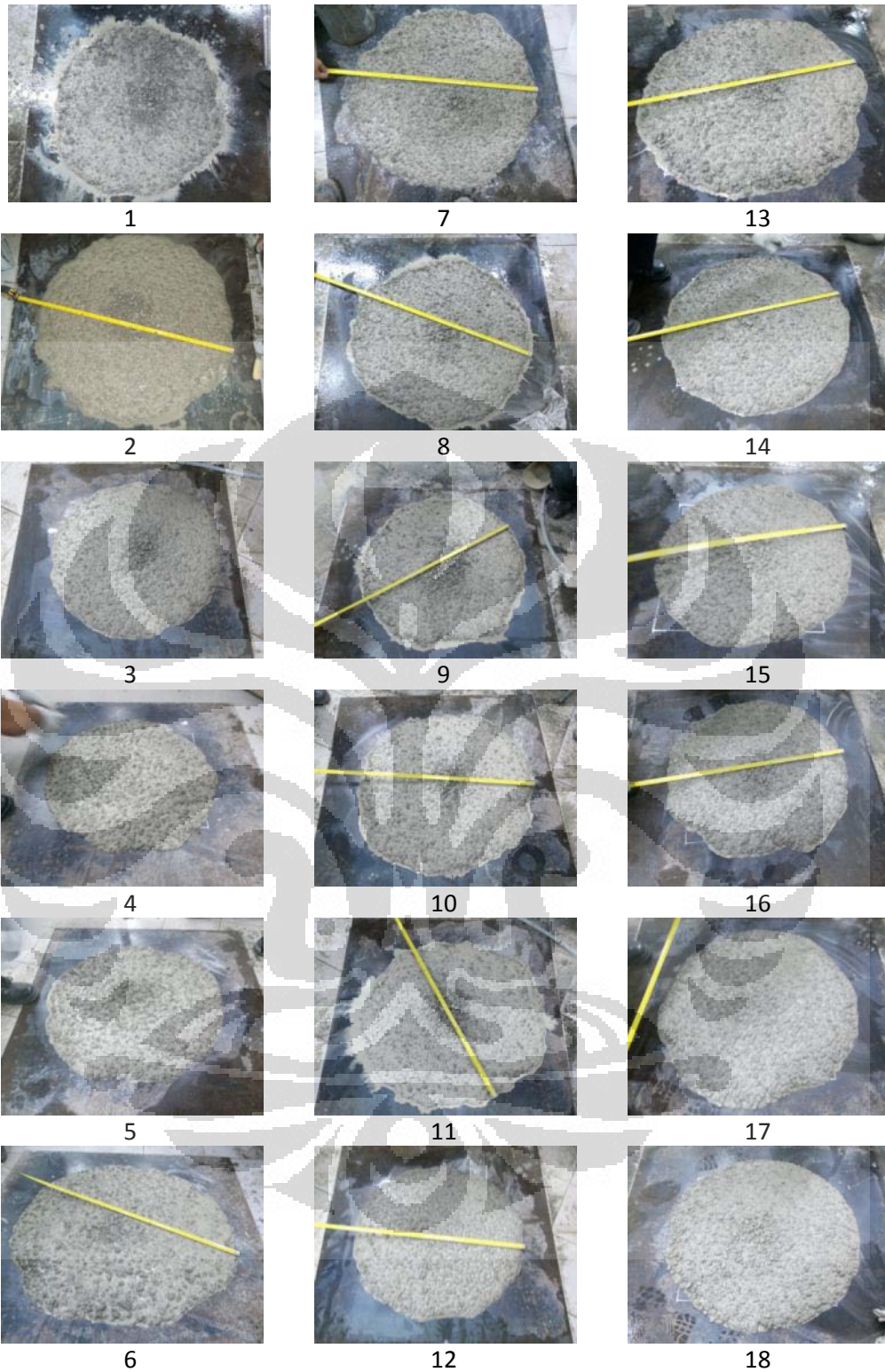


Lampiran 2 : Hasil uji *workability* dalam pemilihan *mix design*

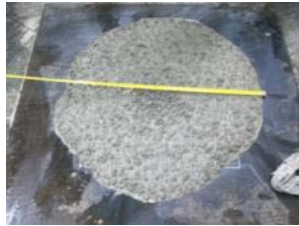
Mix	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm ratio	SP (kg/m <sup>3</sup> )	Slump flow (mm)	T <sub>500</sub> (s)	VSI ASTM C 1611	Keterangan	Remark
1	500	50	329	768	187	0,3	7,5			3	Segregasi	X
2	500	50	329	768	160	0,3	7,5	790	8	3	Segregasi	X
3	500	26,5	250	823	155	0,3	7	770	3	3	Segregasi	X
4	500	25	245	823	150	0,3	6,5	690	27	0	kurang flow	X
5	500	26	245	823	150	0,3	6,5	730	13	3	Segregasi	X
6	500	25	245	823	150	0,3	7	770	7	2	Segregasi	X
7	500	50	329	768	154	0,3	7,5	760	8	2	Segregasi	X
8	500	50	329	823	154	0,3	7,5	780	6	3	Segregasi	X
9	500	80	329	768	162	0,3	7,5	785	2	3	Segregasi	X
10	500	25	329	823	147	0,3	6,3	760	4	3	Segregasi	X
11	500	25	329	823	147	0,3	7,5	800	2	3	Segregasi	X
12	500	26,5	250	823	150	0,3	6,5	740	8	0	tidak segregasi	V
13	500	31,5	250	823	150	0,3	6,5	750	6	2	Segregasi	X
14	500	36,5	250	823	150	0,3	6,5	750	7	2	Segregasi	X
15	500	41,5	250	823	150	0,3	6,5	690	6	2	Segregasi	X
16	500	26,5	250	823	150	0,3	6,8	710	8	2	segregasi	X
17	500	26,5	250	823	150	0,3	7	730	8	2	segregasi	X
18	500	26,5	250	823	150	0,3	7,3	700	8	2	segregasi	X
19	500	31,5	250	823	150	0,3	7,3	730	8	2	segregasi	X
20	500	31,5	110	823	150	0,3	6,5	890	3	2	segregasi	X
21	500	26,5	160	823	150	0,3	6,5	920	2	3	segregasi	X
22	500	26,5	250	823	150	0,3	6,5	880	1	3	segregasi	X
23	500	26,5	225	823	150	0,3	6,5	850	3	3	segregasi	X
24	500	26,5	200	823	150	0,3	6,5	950	2	3	segregasi	X
25	500	26,5	240	823	150	0,3	6,5	820	5	3	segregasi	X
26	500	26,5	245	823	150	0,3	6,5	790	4	2	segregasi	X
27	500	50	329	768	149	0,3	7,5	730	6	3	segregasi	X
28	500	70	329	768	154	0,3	7,5	790	3	3	segregasi	X
29	500	50	329	823	147	0,3	7,5	840	3	3	segregasi	X
30	500	26,5	250	823	140	0,3	6,5	800	5	3	Segregasi	X
31	500	46,5	250	823	150	0,3	6,5	730	8	3	segregasi	X
32	500	50	329	768	143	0,3	7,5	710	11	3	segregasi	X
33	500	60	329	768	146	0,3	7,5	730	5	3	segregasi	X
34	500	50	329	768	138	0,3	7,5	700	13	3	segregasi	X
35	500	26,5	250	823	130	0,2	7	790	8	0	tidak segregasi	V
36	500	26,5	250	823	122	0,2	6,5	765	10	0	tidak segregasi	V
37	500	26,5	250	823	110	0,2	7,1	780	12	0	tidak segregasi	V
38	500	41,5	250	823	133	0,2	6,5	795	4	1	tidak segregasi	V
39	500	26,5	250	823	150	0,3	6,5	800	3	2	Segregasi	X



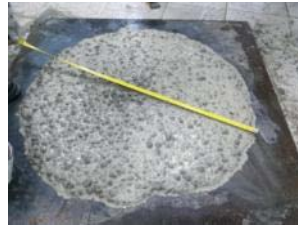
Lampiran 2 : (lanjutan)



Lampiran 2 : (lanjutan)



19



25



31



20



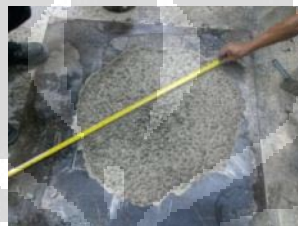
26



32



21



27



33



22



28



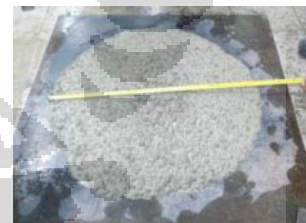
34



23



29



35



24



30



36

Lampiran 2 : (lanjutan)



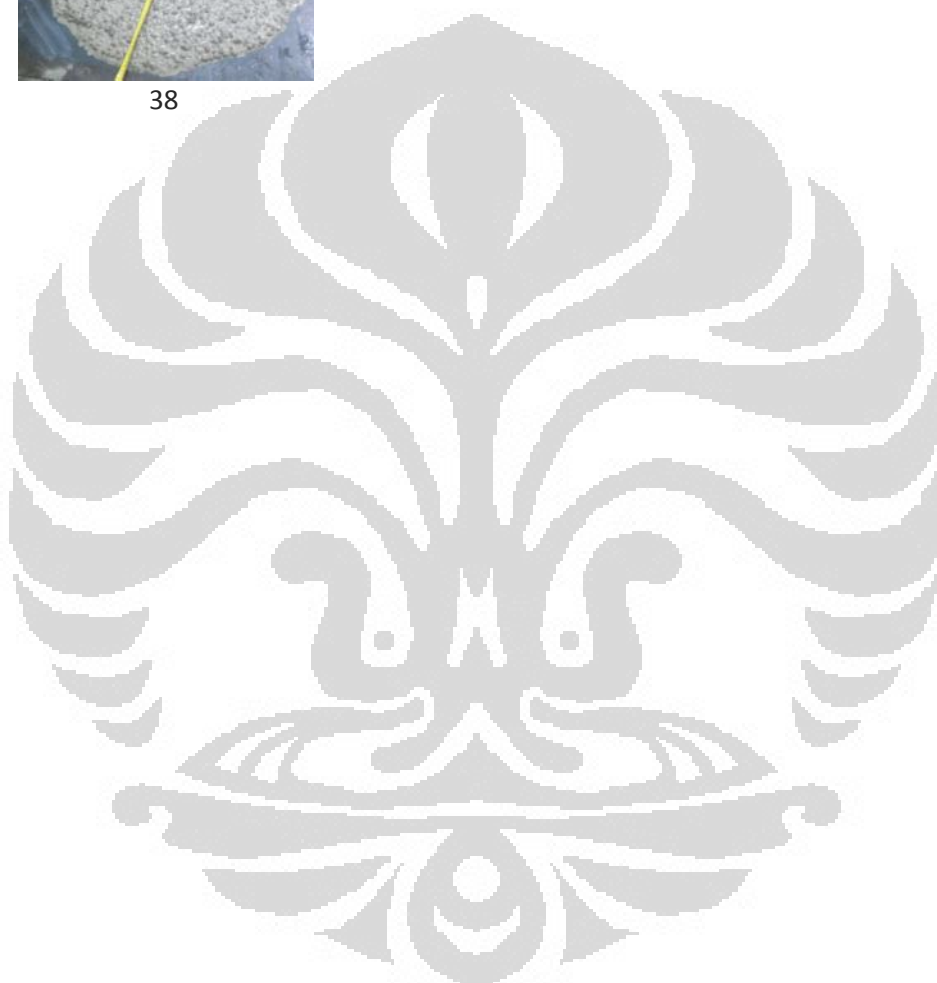
37



39



38



Lampiran 3: Beton segar (*fresh concrete*) Mix D kubus dan silinder

Mix D kubus	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm ratio	Super-plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Slump Flow (mm)	T <sub>500</sub> (detik)	V-funnel (detik)	VSI
1	500	26,5	250	823	116	0,2	7,11	725	10	36	0
2	500	26,5	250	823	112	0,2	7,11	780	7	28	0
3	500	26,5	250	823	112	0,2	7,11	785	9	34	0
4	500	26,5	250	823	108	0,2	7,11	785	9	32	0

Mix D kubus + PVA	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm ratio	Super-plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	PVA fiber (kg/m <sup>3</sup> )	Slump Flow (mm)	T <sub>500</sub> (detik)	V-funnel (detik)	VSI
1	500	27	250	823	111	0,2	7,11	0,32	725	4	26	1
2	500	27	250	823	118	0,2	7,11	0,32	720	6	20	1
3	500	27	250	823	118	0,2	7,11	0,32	730	7	17	0
4	500	27	250	823	118	0,2	7,11	0,32	720	8	29	0

Mix D silinder	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm ratio	Super-plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	Slump Flow (mm)	T <sub>500</sub> (detik)	V-funnel (detik)	VSI
1	500	27	250	823	118	0,2	7,11	760	10	44	1
2	500	27	250	823	123	0,2	7,11	760	9	28	0
3	500	27	250	823	123	0,2	7,11	795	6	19	1
4	500	27	250	823	130	0,2	7,11	790	10	49	0

Mix D silinder + PVA	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Fly ash (kg/m <sup>3</sup> )	Pumice (kg/m <sup>3</sup> )	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Water (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm ratio	Super-plasticizer (kg/m <sup>3</sup> )	PVA fiber (kg/m <sup>3</sup> )	Slump Flow (mm)	T <sub>500</sub> (detik)	V-funnel (detik)	VSI
1	500	27	250	823	125	0,2	7,11	0,32	740	7	19	0
2	500	27	250	823	125	0,2	7,11	0,32	745	7	20	0
3	500	27	250	823	124	0,2	7,11	0,32	715	10	28	0
4	500	27	250	823	125	0,2	7,11	0,32	735	9	18	0

Mix D Kubus



Pengulangan ke-1 (VSI 0)



Pengulangan ke-2 (VSI 0)

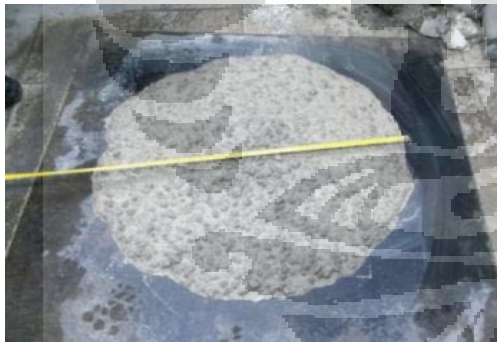


Pengulangan ke-3 (VSI 0)

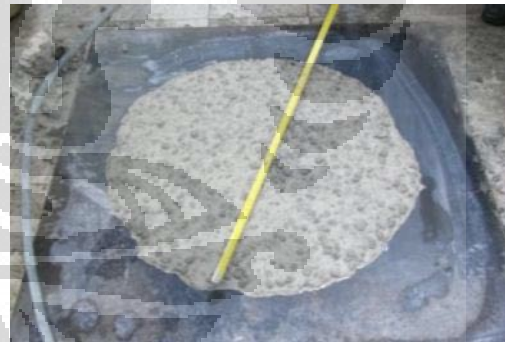


Pengulangan ke-4 (VSI 0)

Mix D Kubus+PVA



Pengulangan ke-1 (VSI 1)



Pengulangan ke-2 (VSI 1)



Pengulangan ke-3 (VSI 0)



Pengulangan ke-4 (VSI 0)

Mix D Silinder



Pengulangan ke-1 (VSI 1)



Pengulangan ke-2 (VSI 0)



Pengulangan ke-3 (VSI 1)



Pengulangan ke-4 (VSI 0)

Mix D Silinder+PVA



Pengulangan ke-1 (VSI 0)



Pengulangan ke-2 (VSI 0)



Pengulangan ke-3 (VSI 0)



Pengulangan ke-4 (VSI 0)

Lampiran 4: Analisa statistik hasil uji pada beton keras (*hardened concrete*) Mix D Kubus dan Silinder

Kuat Tekan (*Compressive strength*)

Mix D Kubus

Mix Kubus	Kuat Tekan, $f_c$ , 3 hari (MPa)						Nilai Rata-Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of variation (%)	Standar Error of mean
	1	2	3	4	5	6				
D1	21,7	22,3	25,4	24,5	24,0	23,4	23,6	1,40	5,94	0,57
D2	21,7	22,3	22,5	24,5	24,0	23,4	23,1	1,11	4,80	0,45
D3	24,7	23,2	22,5	23,2	26,6	29,5	25,0	2,67	10,69	1,09
	Kuat Tekan, $f_c$ , 7 hari (MPa)									
D1	27,7	26,7	26,9	27,2	<b>19,1</b>	<b>24,2</b>	27,1	0,43	1,57	0,21
D2	28,6	30,5	38,3	30,0	27,7	30,4	30,9	3,80	12,30	1,55
D3	<b>24,7</b>	<b>18,8</b>	36,1	26,7	<b>23,6</b>	28,8	30,5	4,93	16,16	2,85
	Kuat Tekan, $f_c$ , 28 hari (MPa)									
D1	31,9	<b>28,9</b>	32,5	<b>29,1</b>	33,6	<b>26,4</b>	32,7	0,86	2,64	0,50
D2	55,7	51,4	31,9	<b>30,2</b>	42,7	51,9	46,7	9,56	20,48	4,28
D3	50,8	51,4	53,4	47,9	43,6	51,9	49,8	3,55	7,11	1,45
	Density, 28 hari ( $\text{kg/m}^3$ )									
D1	2003,0	2035,6	2056,3	1940,7	1997,0	2020,7	2008,9	39,80	1,98	16,25
D2	1952,6	1994,1	2047,4	1958,5	1991,1	2017,8	1993,6	35,77	1,79	14,60
D3	2003,0	2023,7	2011,9	2023,7	2044,4	2035,6	2023,7	15,11	0,75	6,17

Mix Kubus + non PVA	Kuat Tekan, $f_c$ , 3 hari (MPa)					
	1	2	3	4	5	6
D1	0,08	0,05	0,08	0,04	0,02	0,01
D2	0,06	0,03	0,03	0,06	0,04	0,01
D3	0,01	0,07	<b>0,10</b>	0,07	0,07	<b>0,18</b>
	Kuat Tekan, $f_c$ , 7 hari (MPa)					
D1	0,02	0,01	0,01	0,00	<b>0,30</b>	<b>0,11</b>
D2	0,07	0,01	<b>0,24</b>	0,03	<b>0,10</b>	0,02
D3	<b>0,19</b>	<b>0,38</b>	<b>0,18</b>	<b>0,12</b>	<b>0,23</b>	0,06
	Kuat Tekan, $f_c$ , 28 hari (MPa)					
D1	0,02	<b>0,12</b>	0,01	<b>0,11</b>	0,03	<b>0,19</b>
D2	<b>0,19</b>	<b>0,10</b>	<b>0,32</b>	<b>0,35</b>	0,09	<b>0,11</b>
D3	0,020	0,032	0,072	0,038	<b>0,124</b>	0,042
	Density, 28 hari ( $\text{kg/m}^3$ )					
D1	0,003	0,013	0,024	0,034	0,006	0,006
D2	0,021	0,000	0,027	0,018	0,001	0,012
D3	0,010	0,000	0,006	0,000	0,010	0,006

Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Kubus	Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)						Nilai Rata Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of variation (%)	Standar Error of mean
	1	2	3	4	5	6				
D1	21,7	22,3	25,4	24,5	24,0	23,4	23,6	1,40	5,94	0,57
D2	21,7	22,3	22,5	24,5	24,0	23,4	23,1	1,11	4,80	0,45
D3	24,7	23,2	-	23,2	26,6	-	24,4	1,58	6,47	0,79
	Kuat Tekan, fc, 7 hari (MPa)									
D1	27,7	26,7	26,9	27,2	-	-	27,1	0,43	1,57	0,21
D2	28,6	30,5	-	30,0	-	30,4	29,9	0,88	2,94	0,44
D3	-	-	-	-	-	28,8	28,8	-	-	-
	Kuat Tekan, fc, 28 hari (MPa)									
D1	31,9	-	32,5	-	33,6	-	32,7	0,86	2,64	0,50
D2	-	-	-	-	42,7	-	42,7	-	-	-
D3	50,8	51,4	53,4	47,9	-	51,9	51,1	2,02	3,96	0,9
	Density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )									
D1	2003,0	2035,6	2056,3	1940,7	1997,0	2020,7	2008,9	39,80	1,98	16,25
D2	1952,6	1994,1	2047,4	1958,5	1991,1	2017,8	1993,6	35,77	1,79	14,60
D3	2003,0	2023,7	2011,9	2023,7	2044,4	2035,6	2023,7	15,11	0,75	6,17

Mix D Kubus+PVA

Mix Kubus + PVA	Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)						Nilai Rata Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of variation (%)	Standar Error of mean
	1	2	3	4	5	6				
D1	21,4	19,2	22,1	18,1	20,3	17,8	19,8	1,72	8,67	0,70
D2	26,0	14,7	26,6	14,6	17,8	20,6	20,1	5,31	26,49	2,17
D3	26,1	19,8	21,3	20,6	19,9	20,5	21,4	2,38	11,15	0,97
	Kuat Tekan, fc, 7 hari (MPa)									
D1	12,9	24,3	21,2	25,8	15,5	24,2	24,8	0,88	3,55	0,51
D2	28,0	27,1	25,8	21,0	28,4	22,4	26,3	2,45	9,30	1,10
D3	24,4	24,6	26,1	31,1	25,1	23,0	25,7	2,81	10,91	1,15
	Kuat Tekan, fc, 28 hari (MPa)									
D1	25,5	30,6	23,6	26,1	32,3	34,1	32,3	1,75	5,41	1,01
D2	34,6	35,8	25,6	26,1	30,5	27,5	33,7	2,80	8,31	1,61
D3	30,5	32,6	28,6	32,2	28,2	31,6	31,1	1,60	5,16	0,72
	Density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )									
D1	2026,7	2041,5	2044,4	2011,9	2080,0	2168,9	2062,2	56,99	2,76	23,27
D2	1988,1	2157,0	1937,8	2085,9	1961,5	1988,1	2019,8	84,1	4,16	34,32
D3	1982,2	2044,4	2041,5	2130,4	2083,0	2115,6	2066,2	54,72	2,65	22,34



Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Kubus + PVA	Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)					
	1	2	3	4	5	6
D1	0,08	0,03	<b>0,12</b>	<b>0,09</b>	0,03	<b>0,10</b>
D2	<b>0,29</b>	<b>0,27</b>	<b>0,32</b>	<b>0,27</b>	<b>0,11</b>	0,02
D3	<b>0,22</b>	0,07	0,00	0,04	0,07	0,04
	Kuat Tekan, fc, 7 hari (MPa)					
D1	<b>0,48</b>	0,02	<b>0,15</b>	0,04	<b>0,38</b>	0,02
D2	0,06	0,03	0,02	<b>0,20</b>	0,08	<b>0,15</b>
D3	0,05	0,04	0,02	<b>0,21</b>	0,02	<b>0,11</b>
	Kuat Tekan, fc, 28 hari (MPa)					
D1	<b>0,21</b>	0,05	<b>0,27</b>	<b>0,19</b>	0,00	0,06
D2	0,03	0,06	<b>0,24</b>	<b>0,23</b>	<b>0,09</b>	<b>0,18</b>
D3	0,02	0,05	0,08	0,04	<b>0,09</b>	0,02
	Density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )					
D1	0,017	0,010	0,009	0,024	0,009	0,052
D2	0,016	0,068	0,041	0,033	0,029	0,016
D3	0,041	0,011	0,012	0,031	0,008	0,024

Mix Kubus + PVA	Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)						Nilai Rata Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of variation (%)	Standar Error of mean
	1	2	3	4	5	6				
D1	21,4	19,2	-	-	20,3	-	20,3	1,1	5,42	0,64
D2	-	-	-	-	-	20,6	20,6	-	-	-
D3	-	19,8	21,3	20,6	19,9	20,5	20,4	0,61	2,97	0,27
	Kuat Tekan, fc, 7 hari (MPa)									
D1	-	24,3	-	25,8	-	24,2	24,8	0,88	3,55	0,51
D2	28,0	27,1	25,8	-	28,4	-	27,3	1,18	4,32	0,59
D3	24,4	24,6	26,1	-	25,1	-	25,1	0,75	2,97	0,37
	Kuat Tekan, fc, 28 hari (MPa)									
D1	-	30,6	-	-	32,3	34,1	32,3	1,75	5,41	1,01
D2	34,6	35,8	-	-	-	-	35,2	0,87	2,46	0,61
D3	30,5	32,6	28,6	32,2	-	31,6	31,1	1,60	5,16	0,72
	Density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )									
D1	2026,7	2041,5	2044,4	2011,9	2080,0	2168,9	2062,2	56,99	2,76	23,27
D2	1988,1	2157,0	1937,8	2085,9	1961,5	1988,1	2019,8	84,1	4,16	34,32
D3	1982,2	2044,4	2041,5	2130,4	2083,0	2115,6	2066,2	54,7	2,65	22,34

Kuat Belah (Splitting tensile strength)

$$\text{Rumus: } f_{ct} = \frac{2P}{\pi ld}$$

## Mix D Silinder

Mix Silinder	Kuat Belah, fc, 3 hari (MPa)			Nilai Rata-Rata	Standar Deviasi	Coefficient of Variation	Standard Error of
	1	2	3				
D1	2,4	<b>3,1</b>	2,6	2,5	0,14	5,66	0,10
D2	2,6	<b>2,9</b>	2,3	2,5	0,21	7,71	0,15
D3	<b>2,1</b>	2,3	2,7	2,5	0,28	11,31	0,20
	Kuat Belah, fc, 7 hari (MPa)						
D1	2,7	3,2	3,6	3,2	0,35	11,99	0,25
D2	3,1	<b>3,3</b>	2,8	3,0	0,21	7,20	0,15
D3	2,9	3,2	3,0	3,0	0,15	5,03	0,09
	Kuat Belah, fc, 28 hari (MPa)						
D1	<b>3,0</b>	4,1	3,6	3,9	0,35	9,18	0,25
D2	<b>3,2</b>	3,5	<b>2,2</b>	3,5	-	-	-
D3	3,9	<b>3,3</b>	<b>3,3</b>	3,9	-	-	-

Mix Silinder	Kuat Belah, fc, 3 hari (MPa)		
	1	2	3
D1	0,03	<b>0,24</b>	0,06
D2	0,06	<b>0,18</b>	0,06
D3	<b>0,16</b>	0,08	0,07
	Kuat Belah, fc, 7 hari (MPa)		
D1	<b>0,16</b>	0,02	<b>0,14</b>
D2	0,06	<b>0,13</b>	0,06
D3	0,04	0,07	0,01
	Kuat Belah, fc, 28 hari (MPa)		
D1	<b>0,22</b>	0,07	0,07
D2	-	0,00	-
D3	0,01	<b>0,15</b>	<b>0,16</b>

Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Silinder	Kuat Belah, fc, 3 hari (MPa)			Nilai Rata-Rata	Standar Deviasi	Coefficient of Variation	Standard Error of
	1	2	3				
D1	2,4	-	2,6	2,5	0,14	5,66	0,10
D2	2,6	<b>2,9</b>	2,3	2,5	0,21	7,71	0,15
D3	-	2,3	2,7	2,5	0,28	11,31	0,20
Kuat Belah, fc, 7 hari (MPa)							
D1	-	3,2	-	3,2	-	-	-
D2	3,1	-	2,8	3,0	0,21	7,20	0,15
D3	2,9	3,2	3,0	3,0	0,15	5,03	0,09
Kuat Belah, fc, 28 hari (MPa)							
D1	-	4,1	3,6	3,9	0,35	9,18	0,25
D2	-	3,5	-	3,5	-	-	-
D3	3,9	-	-	3,9	-	-	-

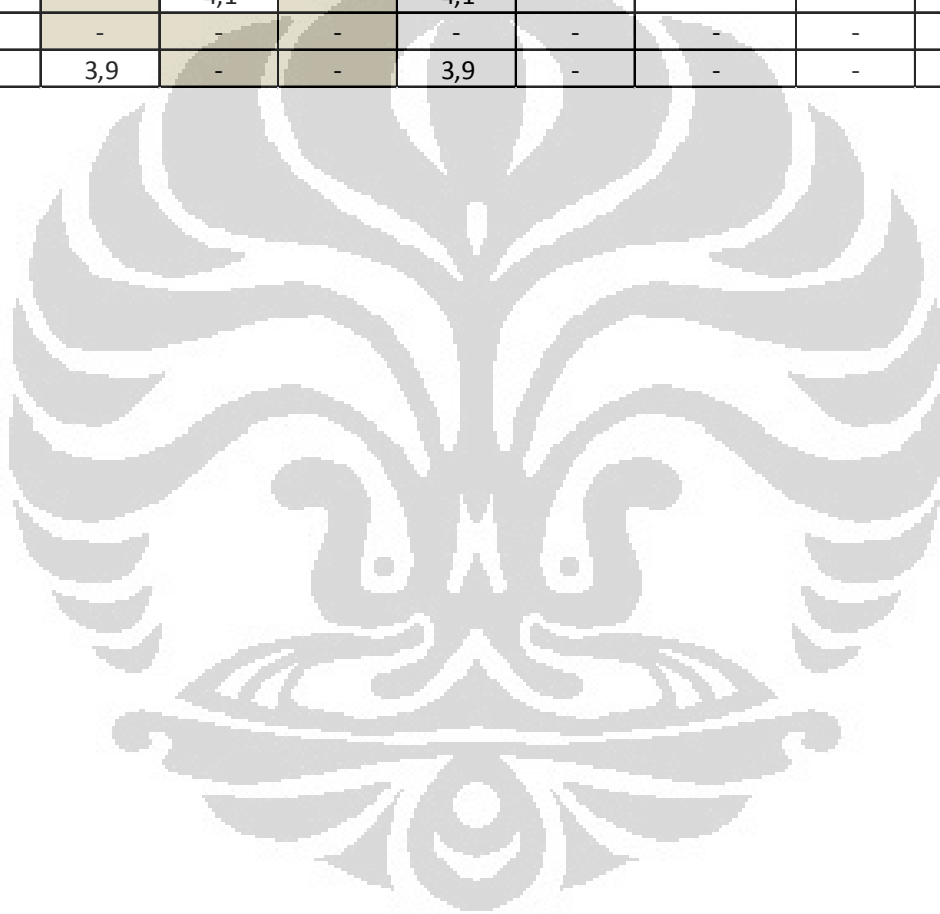
Mix D Silinder+PVA

Mix Silinder + PVA	Kuat Belah, fc, 3 hari (MPa)			Nilai Rata-Rata	Standar Deviasi	Coefficient of Variation	Standard Error of	Range (Max-Min)
	1	2	3					
D1	2,6	2,7	2,6	2,6	0,06	2,20	0,03	0,1
D2	3,3	2,8	1,3	2,5	1,04	42,20	0,6	2,0
D3	2,1	<b>1,9</b>	<b>1,8</b>	2,1	-	-	-	-
Kuat Belah, fc, 7 hari (MPa)								
D1	3,1	<b>2,3</b>	3,6	3,4	0,35	10,60	0,25	0,5
D2	2,6	<b>1,7</b>	2,4	2,5	0,47	21,20	0,27	0,9
D3	<b>2,6</b>	<b>2,0</b>	<b>2,4</b>	2,3	0,31	13,10	0,18	0,6
Kuat Belah, fc, 28 hari (MPa)								
D1	<b>3,1</b>	4,1	<b>3,3</b>	4,1	-	-	-	-
D2	3,4	3,1	<b>3,1</b>	-	-	-	-	-
D3	3,9	3,1	<b>2,9</b>	3,9	-	-	-	-

Mix Silinder + PVA	Kuat Belah, fc, 3 hari (MPa)		
	1	2	3
D1	0,01	0,03	0,00
D2	<b>0,32</b>	<b>0,13</b>	<b>0,46</b>
D3	0,02	<b>0,11</b>	<b>0,13</b>
Kuat Belah, fc, 7 hari (MPa)			
D1	0,09	<b>0,33</b>	0,07
D2	0,03	<b>0,31</b>	0,02
D3	<b>0,11</b>	<b>0,13</b>	<b>0,06</b>
Kuat Belah, fc, 28 hari (MPa)			
D1	-	0,00	-
D2	-	-	-
D3	0,00	-	-

Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Silinder + PVA	Kuat Belah, $f_c$ , 3 hari (MPa)			Nilai Rata Rata	Standar Deviasi	Coefficient of Variation	Standard Error of	Range (Max-Min)
	1	2	3					
D1	2,6	2,7	2,6	2,6	0,06	2,20	0,03	0,1
D2	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	2,1	-	-	2,1	-	-	-	-
	Kuat Belah, $f_c$ , 7 hari (MPa)							
D1	-	-	3,6	3,6	-	-	-	-
D2	2,6	-	2,4	2,5	0,47	21,2	0,27	0,9
D3	-	-	-	-	-	-	-	-
	Kuat Belah, $f_c$ , 28 hari (MPa)							
D1	-	4,1	-	4,1	-	-	-	-
D2	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	3,9	-	-	3,9	-	-	-	-



Perhitungan Modulus Elastisitas ( $E_c$ )

Rumus:  $E_c = 33(w^{1,5})\sqrt{f'_c}$  psi

1 kg/m<sup>3</sup> = 0,075866 lb/ft<sup>3</sup>.

1 MPa = 145,0377 psi.

## Mix D Silinder

Mix Silinder	Kuat Tekan, $f_c$ , 3 hari (MPa)			Nilai Rata-Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of Variation (%)	Standard Error of Mean
	1	2	3				
D1	9,2	9,8	9,2	9,4	0,35	3,68	0,20
D2	8,1	7,9	7,7	7,9	0,23	2,93	0,13
D3	11,9	9,6	9,9	10,5	1,25	12,00	0,72
density, 3 hari (kg/m <sup>3</sup> )							
D1	1977,9	2032,6	1928,9	1979,8	51,88	2,62	29,95
D2	1977,9	2032,6	1928,9	1979,8	51,88	2,62	29,95
D3	1927,0	1983,6	1962,8	1957,8	28,62	1,46	16,52
Kuat Tekan, $f_c$ , 7 hari (MPa)							
D1	11,5	12,6	13,2	12,4	0,84	6,78	0,49
D2	15,1	12,4	12,3	13,3	1,56	11,75	0,90
D3	8,1	11,5	11,3	11,4	0,14	1,24	0,10
density, 7 hari (kg/m <sup>3</sup> )							
D1	1944,0	1991,1	1989,2	1974,0	26,69	1,35	15,41
D2	1981,7	2040,1	1966,6	1996,1	38,84	1,95	22,42
D3	1928,9	1996,8	2021,3	1982,31	47,86	2,41	27,63
Kuat Tekan, $f_c$ , 28 hari (MPa)							
D1	20,4	16,4	22,5	19,8	3,09	15,63	1,78
D2	16,2	12,8	14,2	15,2	1,41	9,30	1,00
D3	13,7	18,7	17,3	16,6	1,41	7,90	1
density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )							
D1	1936,4	1981,7	2030,7	1982,9	47,15	2,38	27,22
D2	2036,4	1921,3	2028,8	1995,5	64,34	3,22	37,15
D3	1921,3	2013,7	1930,8	1955,3	50,84	2,60	29,35

Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Silinder	Kuat Tekan, $f_c$ , 3 hari (MPa)		
	1	2	3
D1	0,02	0,04	0,02
D2	0,03	0,01	0,03
D3	<b>0,13</b>	0,08	0,06
	density, 3 hari (kg/m <sup>3</sup> )		
D1	0,00	0,03	0,03
D2	0,00	0,03	0,03
D3	0,02	0,01	0,00
	Kuat Tekan, $f_c$ , 7 hari (MPa)		
D1	0,07	0,02	0,06
D2	<b>0,13</b>	0,07	0,07
D3	<b>0,29</b>	0,01	0,01
	density, 7 hari (kg/m <sup>3</sup> )		
D1	0,02	0,01	0,01
D2	0,01	0,02	0,01
D3	0,03	0,01	0,02
	Kuat Tekan, $f_c$ , 28 hari (MPa)		
D1	0,03	<b>0,17</b>	<b>0,14</b>
D2	0,06	<b>0,16</b>	0,07
D3	<b>0,17</b>	<b>0,13</b>	0,04
	density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )		
D1	0,02	0,00	0,02
D2	0,02	0,04	0,02
D3	0,02	0,03	0,01

Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Silinder	Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)			Nilai Rata Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of Variation (%)	Standard Error of Mean
	1	2	3				
D1	9,2	9,8	9,2	9,4	0,35	3,68	0,20
D2	8,1	7,9	7,7	7,9	0,23	2,93	0,13
D3	-	9,6	9,9	9,7	0,17	1,74	0,12
density, 3 hari (kg/m <sup>3</sup> )							
D1	1977,9	2032,6	1928,9	1979,8	51,88	2,62	29,95
D2	1977,9	2032,6	1928,9	1979,8	51,88	2,62	29,95
D3	1927,0	1983,6	1962,8	1957,8	28,62	1,46	16,52
Kuat Tekan, fc, 7 hari (MPa)							
D1	11,5	12,6	13,2	12,4	0,84	6,78	0,49
D2	-	12,4	12,3	12,4	0,06	0,52	0,05
D3	-	11,5	11,3	11,4	0,14	1,24	0,10
density, 7 hari (kg/m <sup>3</sup> )							
D1	1944,0	1991,1	1989,2	1974,0	26,69	1,35	15,41
D2	1981,7	2040,1	1966,6	1996,1	38,84	1,95	22,42
D3	1928,9	1996,8	2021,3	1982,3	47,86	2,41	27,63
Kuat Tekan, fc, 28 hari (MPa)							
D1	20,4	-	-	20,4	-	-	-
D2	16,2	-	14,2	15,2	1,41	9,30	1,00
D3	-	-	17,3	17,3	-	-	-
density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )							
D1	1936,4	1981,7	2030,7	1982,9	47,15	2,38	27,22
D2	2036,4	1921,3	2028,8	1995,5	64,34	3,22	37,15
D3	1921,3	2013,7	1930,8	1955,3	50,84	2,60	29,35

Mix Silinder + non PVA	D1	D2	D3	Nilai Rata Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Standar Error of mean	Coefficient of variation (%)
Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)	9,4	-	9,7	9,6	0,21	0,15	2,22
Kuat Tekan, fc, 7hari (MPa)	12,4	12,4	11,4	12,1	0,58	0,33	4,79
Kuat Tekan, fc, 28hari (MPa)	-	15,2	17,3	16,3	1,48	1,05	9,14
density, 3 hari (kg/m <sup>3</sup> )	1979,8	1979,8	1957,8	1972,5	12,70	7,33	0,06
density, 7 hari (kg/m <sup>3</sup> )	1974,0	1996,1	1982,3	1984,2	11,18	6,46	0,56
density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )	1982,9	1995,5	1955,3	1977,9	20,56	11,87	1,04

Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Silinder + non PVA	Nilai Rata-Rata Test (MPa)	One sample t Test			Keterangan		
		t statistik	DF	Prob> t	Null Hypothesis:	Alternative Hypothesis:	At the 0.05 level
Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)	9,7	-1	1	0,5	Mean = 9,7	Mean < 9,7	the population mean is NOT significantly different with the test mean (9,7)
Kuat Tekan, fc, 7hari (MPa)	12,4	-1	1	0,42265	Mean = 12,4	Mean < 12,4	the population mean is NOT significantly different with the test mean (12,4)
Kuat Tekan, fc, 28hari (MPa)	17,3	-1	1	0,5	Mean = 17,3	Mean < 17,3	the population mean is NOT significantly different with the test mean (17,3)
density, 3 hari (kg/m3)	1979,8	-1	2	0,42265	Mean = 1979,8	Mean < 1979,8	the population mean is NOT significantly different with the test mean (1979,8)
density, 7 hari (kg/m3)	1996,1	-1,85066	2	0,20544	Mean = 1996,1	Mean < 1996,1	the population mean is NOT significantly different with the test mean (1996,1)
density, 28 hari (kg/m3)	1995,5	-1,48261	2	0,2764	Mean = 1995,5	Mean < 1995,5	the population mean is NOT significantly different with the test mean (1995,5)

Mix D Silinder+PVA

Mix Silinder + PVA	Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)			Nilai Rata-Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of Variation (%)	Standard Error of Mean
	1	2	3				
D1	10,4	15,8	13,2	13,1	2,70	20,56	2,70
D2	9,2	14,7	11,8	11,9	2,75	23,09	1,59
D3	12,0	13,0	8,9	12,5	0,66	5,32	0,47
density, 3 hari (kg/m3)							
D1	1947,7	1951,5	1934,5	1944,6	8,91	0,46	5,14
D2	1953,4	1951,5	1953,4	1952,8	1,09	0,00	0,63
D3	1953,4	1951,5	1953,4	1952,8	1,09	0,00	0,63
Kuat Tekan, fc, 7 hari (MPa)							
D1	14,0	16,0	12,0	14,0	2,00	14,29	1,15
D2	12,0	14,0	10,0	13,0	1,41	10,88	1,00
D3	13,5	12,0	11,0	13,5	-	-	-
density, 7 hari (kg/m3)							
D1	1944,0	1991,1	1989,2	1974,8	26,69	1,35	15,41
D2	1981,7	2040,1	1966,6	1996,1	38,84	1,95	22,42
D3	1981,7	2040,1	1966,6	1996,1	38,84	1,95	22,42
Kuat Tekan, fc, 28 hari (MPa)							
D1	15,1	15,6	11,5	15,4	0,35	2,30	0,25
D2	12,3	12,6	9,4	-	-	-	-
D3	10,6	15,8	11,3	15,8	-	-	-
density, 28 hari (kg/m3)							
D1	1994,9	2013,7	1906,3	1971,6	57,39	2,91	33,13
D2	1966,6	1966,6	1913,8	1949,0	30,48	1,56	17,60
D3	2015,6	1998,7	1989,2	2001,2	13,38	0,67	7,72



Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Silinder + PVA	Kuat Tekan, $f_c$ , 3 hari (MPa)		
	1	2	3
D1	<b>0,21</b>	<b>0,21</b>	0,00
D2	<b>0,23</b>	<b>0,24</b>	0,01
D3	0,04	0,04	<b>0,29</b>
density, 3 hari (kg/m <sup>3</sup> )			
D1	0,00	0,00	0,01
D2	0,00	0,00	0,00
D3	0,00	0,00	0,00
Kuat Tekan, $f_c$ , 7 hari (MPa)			
D1	0,00	<b>0,14</b>	<b>0,14</b>
D2	0,08	0,08	<b>0,23</b>
D3	0,00	-	-
density, 7 hari (kg/m <sup>3</sup> )			
D1	0,02	0,01	0,01
D2	0,01	0,04	0,01
D3	0,01	0,04	0,01
Kuat Tekan, $f_c$ , 28 hari (MPa)			
D1	0,01	0,01	<b>0,25</b>
D2	-	-	-
D3	-	0,00	-
density, 28 hari (kg/m <sup>3</sup> )			
D1	0,01	0,02	0,03
D2	0,01	0,01	0,02
D3	0,01	0,00	0,01

Lampiran 4: (lanjutan)

Mix Silinder + PVA	Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)			Nilai Rata Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Coefficient of Variation (%)	Standard Error of Mean
	1	2	3				
D1	-	-	13,2	13,2	-	-	-
D2	-	-	11,8	11,8	-	-	-
D3	12,0	13,0	-	12,5	0,66	5,32	0,47
density, 3 hari (kg/m3)							
D1	1947,7	1951,5	1934,5	1944,6	8,91	0,46	5,14
D2	1953,4	1951,5	1953,4	1952,8	1,09	0,00	0,63
D3	1953,4	1951,5	1953,4	1952,8	1,09	0,00	0,63
Kuat Tekan, fc, 7 hari (MPa)							
D1	14,0	-	-	14,0	-	-	-
D2	12,0	14,0	-	13,0	1,41	10,88	1,00
D3	13,5	-	-	13,5	-	-	-
density, 7 hari (kg/m3)							
D1	1944,0	1991,1	1989,2	1974,8	26,69	1,35	15,41
D2	1981,7	2040,1	1966,6	1996,1	38,84	1,95	22,42
D3	1981,7	2040,1	1966,6	1996,1	38,84	1,95	22,42
Kuat Tekan, fc, 28 hari (MPa)							
D1	15,1	15,6	-	15,4	0,35	2,30	0,25
D2	-	-	-	-	-	-	-
D3	-	15,8	-	15,8	-	-	-
density, 28 hari (kg/m3)							
D1	1994,9	2013,7	1906,3	1971,6	57,39	2,91	33,13
D2	1966,6	1966,6	1913,8	1949,0	30,48	1,56	17,60
D3	2015,6	1998,7	1989,2	2001,2	13,38	0,67	7,72

Mix Silinder + PVA	D1	D2	D3	Nilai Rata Rata (MPa)	Standar Deviasi (SD)	Standar Error of mean	Coefficient of variation (%)
Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)	13,2	11,8	12,5	12,5	0,70	0,40	5,60
Kuat Tekan, fc, 7hari (MPa)	14,0	13,0	13,5	13,5	0,50	0,29	3,70
Kuat Tekan, fc, 28hari (MPa)	15,4	-	15,8	15,6	0,28	0,20	1,81
density, 3 hari (kg/m3)	1944,6	1952,8	1952,8	1950,1	4,73	2,73	0,24
density, 7 hari (kg/m3)	1974,8	1996,1	1996,1	1989,0	12,3	7,1	0,62
density, 28 hari (kg/m3)	1971,6	1949,0	2001,2	1973,9	26,18	15,11	1,33

Mix Silinder + PVA	Nilai Rata Rata Test (MPa)	One sample t Test			Keterangan		
		t statistik	DF	Prob> t	Null Hypothesis:	Alternative Hypothesis:	At the 0.05 level
Kuat Tekan, fc, 3 hari (MPa)	13,2	-1,73205	2	0,2254	Mean = 13,2	Mean <> 13,2	the population mean is NOT significantly different with the test mean (13,2)
Kuat Tekan, fc, 7hari (MPa)	14,0	-1,73205	2	0,2254	Mean = 14,0	Mean <> 14,0	the population mean is NOT significantly different with the test mean (14,0)
Kuat Tekan, fc, 28hari (MPa)	15,8	-1	1	0,5	Mean = 15,8	Mean <> 15,8	the population mean is NOT significantly different with the test mean (15,8)
density, 3 hari (kg/m3)	1952,8	-1	2	0,42265	Mean = 1952,8	Mean <> 1952,8	the population mean is NOT significantly different with the test mean (1952,8)
density, 7 hari (kg/m3)	1996,1	-1	2	0,42265	Mean = 1996,1	Mean <> 1996,1	the population mean is NOT significantly different with the test mean (2001,2)
density, 28 hari (kg/m3)	2001,2	-1,80407	2	0,21299	Mean = 2001,2	Mean <> 2001,2	the population mean is NOT significantly different with the test mean (1996,1)

Lampiran 5 : Bahan dan alat penelitian SCLWAC-*pumice*

		
<p>Semen PCC</p>	<p><i>fly ash</i></p>	<p><i>pumice</i></p>
		
<p>Pasir alam</p>	<p>fiber PVA</p>	<p>Jaw Crusher</p>
		
<p>Ayakan</p>	<p>Timbangan digital</p>	<p>Alat ukur humidity dan suhu ruangan</p>
		
<p>(a) V-funnel, (b) Pan mixer, (c) Slump cone, (d) meteran, (e) stopwatch, (f) flow table, (g) VISCOCRETE superplastizicer</p>		

Lampiran 6 : Alur penelitian SCLWAC-pumice



*Pumice*



Proses *casting* cetakan kubus dan silinder



*hardened concrete* kubus dan silinder



*Jaw Crusher*



*Fresh concrete (slump flow test)*



Proses curing



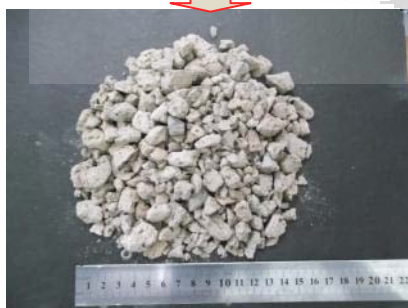
Ayakan



Proses Mixing



Uji *Compressive strength*



*Pumice* max.19,1 mm



Penimbangan



(a) Uji *splitting tensile strength*  
(b) Uji Tekan Untuk Modulus Elastisitas

