

**PENGARUH KADAR FLY ASH SEBAGAI PENGANTI  
SEBAGIAN SEMEN TERHADAP SUSUT KERING DAN  
AUTOGENOUS PADA *HIGH VOLUME FLY ASH – SELF  
COMPACTING CONCRETE***

*Effect of Fly Ash Content as a Substitute for Portions of Cement on Drying and  
Autogenous Shrinkage of High Volume Fly Ash - Self Compacting Concrete*

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Menempuh Ujian Sarjana Teknik  
Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik UNS



Disusun Oleh :

**MUHAMMAD TAIB MIRZA ADITYA**  
**NIM I 0108121**

**JURUSAN TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
SURAKARTA**

**2012**

*commit to user*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang saat ini paling banyak digunakan dalam dunia konstruksi. Perkembangan modifikasi beton saat ini sudah sangat pesat. Berbagai macam jenis beton telah banyak ditemukan dan digunakan. Berbagai penelitian juga telah banyak dilakukan untuk memperoleh beton dengan kualitas yang tinggi, yakni memiliki kuat tekan yang tinggi (*high compressive strength*), kemampuan pengerjaan yang bagus (*good workability*), kemampuan pengaliran yang bagus (*good flowability*), serta keawetannya yang tahan lama (*high durability*). Diharapkan dengan tercapainya kriteria-kriteria tersebut, dapat mengatasi berbagai permasalahan yang timbul saat pengerjaan konstruksi.

Salah satu permasalahan yang terjadi adalah saat dilakukan pengecoran pada konstruksi yang memiliki desain bangunan yang unik dan metode konstruksi yang bervariasi. Pada beberapa kasus konstruksi yang tidak memungkinkan penggunaan *vibrator* yakni pada daerah dengan penulangan yang padat (*congested area*). Penggunaan beton konvensional pada daerah padat tulangan sudah tidak memadai lagi, karena *vibrator* sudah tidak dapat menjangkau daerah tersebut, sehingga kepadatan yang optimal dan kuat tekan yang direncanakan tidak dapat tercapai dengan baik. Pada keadaan yang tidak memungkinkan penggunaan *vibrator* pengecoran beton hanya mengandalkan sifat *self-compactability* beton segar yang digunakan. Hal tersebut yang menjadi dasar penggunaan *Self Compacting Concrete* (SCC). SCC memiliki sifat kecairan (*fluidity*) yang tinggi sehingga mampu mengalir dan mengisi ruang-ruang di dalam cetakan tanpa proses pemadatan dengan *vibrator* (Tjaronge, 2006).

Keunggulan SCC yang dapat memadat sendiri sangat bermanfaat pada pengecoran daerah padat tulangan. Kemampuan mengalir dengan tingkat ketahanan terhadap segregasi yang tinggi pada SCC disebabkan oleh pembatasan kandungan dan ukuran agregat yang lebih kecil dari pada beton konvensional, rasio air-semen (*w/c-ratio*) yang rendah, serta penggunaan *superplasticizer* yang memadai. *Superplasticizer* yang berbasis *polycarboxylate* digunakan untuk menjaga penggunaan air tetap terkontrol pada beton segar, sehingga didapatkan beton segar yang bersifat *high-flowable* dan *self-compactable*, di mana beton segar mampu mengalir dan memadat dengan memanfaatkan berat sendiri sehingga menghasilkan beton keras yang benar-benar padat atau kompak tanpa dilakukan proses pemadatan atau vibrasi. Pengukuran sifat beton segar jenis *self-compacting concrete* dapat mengacu pada dua alat ukur yang berupa *Slump-Flow Test* dan *L-Shape Box Test* (Grunewald, 2004).

Pada saat ini penggunaan *fly ash* pada campuran beton masih terbatas antara 10% - 35 % dari berat binder dinilai belum maksimal terutama dalam meningkatkan daya tahan (*durability*) terhadap serangan sulfat, alkali-silika ekspansi, dan juga thermal cracking. Kadar penggunaan *fly ash* tersebut dicoba ditingkatkan hingga minimal 50% dari berat binder, sehingga biasa disebut dengan *high volume fly ash concrete* (HVFAC). Keunggulan yang didapatkan adalah ruang antar partikel yang ada pada beton akan lebih berkurang, kepadatannya akan lebih baik, dan butiran *fly ash* yang bulat akan membantu meningkatkan kemampuan pengaliran (*flowabilty*) pada beton segar sehingga beton akan lebih mudah mengalir untuk memadat sendiri.

Pada beton memadat mandiri (SCC) proporsi pasta semen lebih besar dibandingkan dengan proporsi agregat. Hal ini menyebabkan SCC memiliki sifat kecairan (*fluidity*) yang tinggi sehingga mampu mengalir dan mengisi ruang-ruang di dalam cetakan tanpa proses pemadatan dengan *vibrator*. Penggunaan proporsi pasta semen yang lebih banyak dibandingkan proporsi agregat pada beton memadat mandiri (SCC) mengakibatkan proses hidrasi pada beton menjadi bertambah besar. Pada keadaan tersebut susut pada beton juga bertambah secara signifikan mengingat susut yang terjadi pada beton bersumber pada komponen

pastanya sementara agregat hanya bersifat *inert* atau membuat beton menjadi kaku.

Penggunaan bahan tambah *fly ash* pada beton memadat mandiri (SCC) hingga mencapai tingkat kadar tinggi (*High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete*) dapat mengurangi proses hidrasi pada beton. Penggunaan *fly ash* dalam volume tinggi dapat menurunkan hidrasi yang terjadi, sehingga diharapkan dapat mengurangi terjadinya susut pada beton.

Beberapa rumusan telah diajukan untuk memperkirakan besarnya susut beton, sehingga pengaruh susut memang perlu dipertimbangkan (Siswanto, 1990). Susut didefinisikan secara luas sebagai perubahan volume akibat keluarnya air (hidrasi) pada saat beton dalam proses pengerasan. Berdasarkan pada mekanismenya, susut beton terdiri dari susut plastis, susut *autogenous* (proses alami), susut kering, dan susut karbonasi.

Susut kering adalah berkurangnya volume elemen beton jika terjadi kehilangan uap air karena penguapan, terjadi setelah beton mencapai bentuk akhirnya dan proses hidrasi pasta semen telah selesai. Susut *autogenous* terjadi akibat penyusutan air dari pori-pori kapiler beton oleh partikel semen, susut ini akan terjadi pada umur awal beton saat proses hidrasi semen. Banyak faktor yang mempengaruhi besarnya susut beton. Adapun faktor-faktor tersebut adalah semen atau komposisi semen, sifat fisis agregat, jumlah agregat dalam adukan beton, dan zat tambah dalam adukan beton. Penggunaan zat tambah seperti *fly ash* digunakan untuk meningkatkan kinerja dari beton dan mengurangi tingkat susut pada beton, karena *fly ash* dapat bereaksi dengan sisa dari proses hidrasi semen.

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah yang telah diuraikan diatas, maka dapat diambil suatu rumusan masalah sebagai berikut: Bagaimana pengaruh penggunaan *fly ash* dengan volume tinggi nilai terhadap susut kering dan susut autogenous pada *high volume fly ash-self compacting concrete*.

### 1.3 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini reaksi kimia dari senyawa-senyawa pembentuk *high volume fly ash-self compacting concrete* tidak dibahas secara detail. *Fly ash* yang digunakan adalah *fly ash* tipe C yang didapatkan dari PLTU Cilacap.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan *fly ash* dengan volume tinggi terhadap nilai susut kering dan susut autogenous pada *high volume fly ash-self compacting concrete*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

#### 1. Manfaat Teoritis

- a. Memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu bahan dan struktur.
- b. Memberikan wawasan pada masyarakat pada umumnya dan dunia teknik sipil pada khususnya tentang penggantian konsentrasi semen dengan *fly ash* sehingga membentuk *high volume fly ash-self compacting concrete*.

#### 2. Manfaat Praktis

- a. Menambah alternatif pemanfaatan limbah *fly ash* sebagai bahan campuran pembuatan beton untuk mengatasi kekurangan dan kelangkaan bahan pembuat adukan beton serta untuk mengurangi biaya.
- b. Memanfaatkan limbah *fly ash* yang tergolong B3 (Bahan Berbahaya dan Beracun) skala besar untuk diproduksi sebagai bahan bangunan terutama sebagai bahan campuran beton, sehingga menjadi ramah lingkungan.
- c. Memberikan kontribusi bagi dunia konstruksi, khususnya konstruksi plat yang memiliki dimensi yang tipis dan berfungsi sebagai penahan air ataupun atap yang diwajibkan memiliki nilai susut yang kecil agar tidak terjadi keretakan yang berujung pada kegagalan konstruksi.



## BAB 2

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Beton adalah suatu bahan komposit yang terdiri dari campuran semen, air, dan agregat. Pasta semen yang masih segar sebagai campuran antara semen dan air berfungsi untuk menyelimuti seluruh permukaan agregat, yang selanjutnya dalam proses pengerasan pasta semen akan menjadi batu semen (*Cement stone*) akan mengikat agregat membentuk suatu kesatuan yang solid. Perbandingan banyaknya air relatif terhadap banyaknya semen dalam suatu campuran beton merupakan hal yang sangat penting dalam menentukan kekuatan beton. Semakin besar rasio air-semen semakin rendah kuat tekan beton yang dihasilkan. (Phil M.Ferguson,1986,7-8)

Nawy (1985:8) mendefinisikan beton sebagai sekumpulan interaksi mekanis dan kimiawi dari material pembentuknya (agregat, semen, dan air). Untuk mengetahui dan mempelajari perilaku elemen gabungan (bahan-bahan penyusun beton), diperlukan pengetahuan mengenai karakteristik masing-masing komponen tersebut. Neville dan Brooks (1987) mendefinisikan beton sebagai bahan yang terbuat dari berbagai macam tipe semen, agregat, dan juga bahan pozolan, abu terbang, tanur tinggi, serat dan lain-lain.

Salah satu bahan konstruksi bangunan yang masih sangat luas penggunaannya dimasyarakat terutama untuk struktur utama adalah beton. Hal ini berhubungan erat dengan beberapa kelebihan sifat beton dibanding bahan lain antara lain memiliki kuat tekan yang tinggi, dapat dibentuk sesuai dengan keinginan, relatif mudah dalam pelaksanaannya, dapat dihasilkan dengan cara yang sederhana dan modern ( Subakti,1992,2).

*Fly ash* atau biasa dikenal dengan abu terbang merupakan limbah sisa pembakaran batu bara yang dikategorikan sebagai limbah berbahaya (B3) oleh Bapedal. *Fly ash* jika tidak dimanfaatkan dapat menjadi ancaman bagi lingkungan hidup di sekitar kita (Ardha, 2003). Penggunaan *fly ash* sebagai salah satu bahan pengganti semen dapat bermanfaat pada penyelamatan lingkungan di sekitar kita dan sekaligus mampu mengurangi penggunaan semen *Portland* dalam aplikasi pembuatan beton (Hardjito, 2001) dalam Maryoto (2008). Dalam peranan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen didapatkan beberapa keunggulan atau keuntungan antara lain berfungsi untuk menambah kelecakan beton sehingga *workability* beton menjadi lebih baik dan mudah dikerjakan, keunggulan lain yang didapatkan adalah meningkatkan *flowability* dan *self-compactibility*. Penggunaan *fly ash* mampu mereduksi kapur bebas atau  $\text{Ca(OH)}_2$  yang merupakan hasil sampingan dari proses hidrasi semen dan air. *Fly ash* juga berfungsi sebagai *filler* sehingga tujuan untuk mendapatkan struktur beton yang memiliki tingkat kepadatan tinggi dapat dicapai.

*High Volume Fly Ash Concrete* (HVFAC) merupakan campuran beton yang menggunakan *fly ash* dimana prosentase *fly ash* yang digunakan lebih dari 50%. Menurut ASTM C618 penggunaan *fly ash* untuk tipe F dibatasi 15% – 20%. Sedangkan untuk tipe C dibatasi 25% – 35% dari berat binder. *Fly Ash* pada umumnya memberi dampak dalam *workability* dan biaya yang lebih ekonomis pada beton. Namun hal tersebut tidak mencukupi untuk meningkatkan daya tahan (*durability*) untuk serangan sulfat, alkali-silika ekspansi dan juga *thermal cracking*. Malhotra dan Mehta (2003) mengusulkan untuk menggunakan prosentase *fly ash* minimum 50% dari berat semen untuk diterapkan sebagai *mix design* dari *high volume fly ash concrete* (HVFAC). Hal tersebut sangat memungkinkan untuk menghasilkan *workability* yang tinggi, *ultimate strength* yang paling tinggi, dan *durability* yang paling tinggi.

Definisi beton *high volume fly ash* menurut Malhotra dan Mehta (2003) yaitu :

1. Kandungan *fly ash* minimal 50% dari berat binder.
2. *Water content* yang rendah, umumnya kurang dari  $130 \text{ kg/m}^3$ .
3. *Cement content* umumnya tidak lebih dari  $200 \text{ kg/m}^3$ .

4. Untuk campuran beton dengan spesifikasi 28 hari kekuatan 30 MPa atau lebih tinggi, slump > 150 mm dan *water cement ratio* 0,3, wajib digunakan *admixture* yang mengurangi air.
5. Untuk beton expose dengan lingkungan yang membeku digunakan *admixture* khusus.
6. Untuk campuran beton dengan slump < 150 mm kekuatan beton 28 hari kurang dari 30 MPa, *water cement ratio* 0,4 memungkinkan tidak digunakan *superplasticizer*.

Panas hidrasi pada pengecoran beton konvensional menghasilkan suhu 55°-66° C memungkinkan terjadinya *thermal cracking* menjadi lebih besar. HVFAC dengan presentase *fly ash* 50% dapat menurunkan suhu akibat panas hidrasi semen menjadi 30°-35° C sehingga kemungkinan *thermal cracking* dapat diperkecil. Selisih suhu antara bagian dalam dan luar beton diharapkan tidak melebihi 25° C, karena hal tersebut dapat membuat retak pada beton sering terjadi. Beton HVFA secara umum sangat kohesi dan menunjukkan kemungkinan tidak terjadinya *bleeding* dan *segregation*. Beton HVFA juga menunjukkan *workability* dan *pumpability* sangat bagus dengan hasil uji slump lebih rendah dari 75 mm yang digunakan untuk *heavy reinforced structures*. Dengan *workability* dan *pumpability* yang bagus menyebabkan material bergerak mengisi ruang-ruang kosong dan hampir memiliki sifat yang sama dengan beton SCC.

*Self Compacting Concrete* atau yang umum disingkat dengan istilah SCC adalah beton segar yang sangat plastis dan mudah mengalir karena berat sendirinya mengisi keseluruhan cetakan yang dikarenakan beton tersebut memiliki sifat-sifat untuk memadatkan sendiri, tanpa adanya bantuan alat penggetar untuk pemadatan. Beton SCC yang baik harus tetap *homogen*, *kohesif*, tidak *segregasi*, tidak terjadi *blocking*, dan tidak *bleeding*. Beton memadat mandiri pertama kali dikembangkan di Jepang pada tahun 1980-an sebagai upaya untuk mengatasi persoalan pengecoran komponen gedung artistik dengan bentuk geometri tergolong rumit bila dilakukan pengecoran beton normal. Riset tentang SCC masih terus dilakukan hingga sekarang dengan banyak aspek kajian, misalnya ketahanan (*durability*), *permeabilitas* dan kuat tekan (*compressive strength*) (Juvas, 2004).



Dari penelitian yang dilakukan Ouchi (2003), SCC menawarkan beberapa kelebihan antara lain :

1. Pelaksanaannya yang tidak menimbulkan polusi suara,
2. Mengatasi permasalahan pemadatan beton,
3. Mereduksi jumlah tenaga kerja,
4. Konstruksi yang lebih cepat,
5. Dapat meningkatkan kualitas dan durability struktur beton, serta
6. Dapat diperoleh kekuatan beton yang lebih tinggi.

Beton SCC mampu mengadakan konsolidasi atau pemadatan sendiri disebabkan oleh kemampuan pengaliran dan ketahanan terhadap segregasi. Hal ini dimungkinkan dengan penggunaan sedikit kerikil, *superplasticizer*, dan mengurangi perbandingan air dan semen. Kemampuan pengaliran SCC adalah kemampuan campuran beton dalam mengisi sempurna cetakan dan mengalir melewati rongga-rongga kecil atau celah antara tulangan. Pada saat air dibutuhkan untuk meningkatkan daya pengaliran, kekuatan beton dan ketahanan beton terhadap segregasi menjadi terancam. Untuk mengatasi hal ini maka digunakan bahan tambah berupa *superplasticizer*.

*Superplasticizer* dapat meningkatkan konsistensi pasta semen dan membuat pasta semen menyelimuti dan mengikat agregat dengan kuat sehingga beton mampu mengalir tanpa segregasi material. Selain itu, untuk dapat mengalir dengan baik maka perlu volume agregat kasar sama dengan volume agregat halus di dalam desain campuran SCC. Diperlukan juga filler seperti abu terbang dan silica fume. (Tjaronge, 2006).

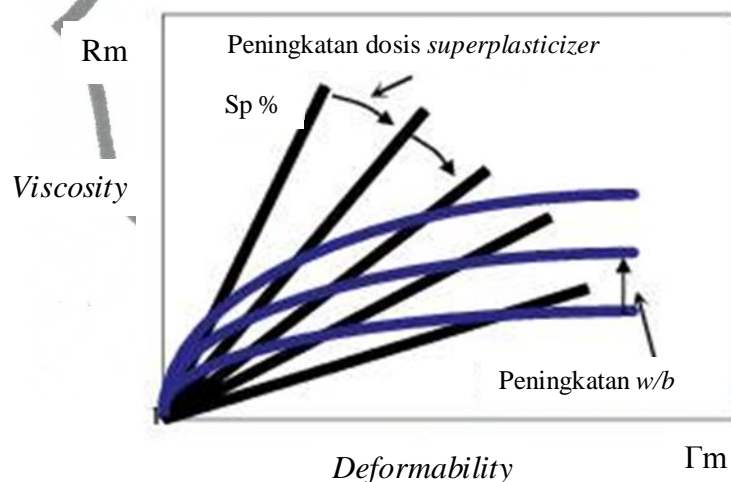
Menurut Okamura dan Ozawa (1995), desain campuran yang digunakan mengacu pada material yang sudah tersedia pada pabrik beton *ready mix*. Kadar agregat kasar dan agregat halus ditentukan terlebih dahulu dan pemadatan sendiri dapat diperoleh dengan mengatur faktor air-bahan pengikat dan dosis *superplasticizer*.

Spesifikasi dari SCC antara lain adalah sebagai berikut :

1. Agregat kasar yang digunakan adalah 50% volume total, agar mortar dapat melewati sela-sela dari agregat kasar yang kurang rapat tersebut.

2. Volume agregat halus ditetapkan hanya 40% dari volume total mortar, yang bertujuan mengisi kekosongan dari agregat kasar.
3. Rasio volume untuk air dan bahan pengikat ditetapkan antara 0,9 hingga 1 tergantung pada sifat pada bahan pengikatnya.
4. Dosis *superplasticizer* dan faktor air - bahan pengikat ditentukan setelahnya untuk mendapatkan pemadatan secara mandiri.

Hal yang berpengaruh dalam *self compacting concrete* adalah *deformability* dan *viscosity*. *Self compacting concrete* yang berkinerja tinggi membutuhkan *deformability* yang tinggi dan segregasi yang rendah. Okumura dan Ouchi (2003) menyatakan bahwa perbandingan antara *deformability* ( $\Gamma_m$ ) dengan *viscosity* ( $R_m$ ) hampir konstan dengan variasi dari *w/b* dengan syarat penggunaan *superplasticizer* yang konstan pula.



**Gambar 2.1** Hubungan Antara *Deformability* dan *Viscosity*

Dari Gambar 2.1 menunjukkan bahwa semakin besar nilai  $\Gamma_m$  maka semakin besar pula *deformability* dari beton, sedangkan nilai  $R_m$  semakin kecil maka *viscosity* dari beton semakin besar.

Beton HVFA yang secara umum sangat kohesi dan menunjukkan kemungkinan tidak terjadinya *bleeding* dan *segregation* serta memiliki *workability* dan *pumpability* yang sangat bagus menyebabkan material bergerak dengan baik mengisi ruang-ruang kosong layaknya SCC. Oleh karena itu, penggunaan *High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete* akan sangat menguntungkan dari segi

*workability* dan *durability*. Kadar *fly ash* yang tinggi pada campuran tersebut akan meningkatkan kemampuan beton untuk mengalir tanpa menggunakan banyak air. Penggunaan air yang semakin sedikit dalam campuran beton ini yang nantinya dapat mempengaruhi besarnya nilai susut yang terjadi.

Penggunaan bahan tambah *fly ash* pada beton memadat mandiri (SCC) hingga mencapai tingkat kadar tinggi (*High Volume Fly Ash-Self Compacting Concrete*) dapat mengurangi proses hidrasi pada beton. Penggunaan *fly ash* dalam volume tinggi dapat menurunkan hidrasi yang terjadi, sehingga diharapkan dapat mengurangi terjadinya susut pada beton.

## 2.2. Landasan Teori

### 2.2.1. Beton

Beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah, atau agregat-agregat lain yang dicampur menjadi satu dengan suatu pasta yang terbuat dari semen dan air membentuk suatu massa mirip batuan. Terkadang, satu atau lebih bahan aditif ditambahkan untuk menghasilkan beton dengan karakteristik tertentu, seperti kemudahan pengerjaan (*workability*), durabilitas, dan waktu pengerasan (McCormac, 2003).

### 2.2.2 Jenis-Jenis Beton

Beton dapat dibedakan berdasarkan material pembentuk dan kegunaan strukturnya, misalnya beton kertas, beton serat, beton dengan *High Volume Fly Ash*, dan beton yang mampu mengalir dan memadat sendiri (*self compacting concrete*). Beton jenis lain pada prinsipnya sama dengan beton normal, yang membedakan adalah material tambahan tertentu yang digunakan untuk mengubah sifat dari beton tersebut.

Dalam perkembangannya banyak penelitian yang telah dilakukan untuk memperbaiki sifat-sifat beton. Selain itu, bahan campurannya juga mengalami

beberapa variasi. Hal ini bertujuan selain untuk meningkatkan kualitas beton juga ditujukan untuk menekan biaya pembuatan beton sekecil mungkin serta lebih ramah lingkungan. Berikut ini merupakan beberapa jenis beton ditinjau dari sifat-sifat dan bahan campurannya.

### 2.2.3. *High Volume Fly Ash Concrete ( HVFAC )*

*High Volume Fly Ash Concrete* merupakan campuran beton yang menggunakan *fly ash* dimana prosentase *fly ash* yang digunakan lebih dari 50%. Menurut ASTM C618 penggunaan *fly ash* untuk tipe F dibatasi 15% – 20%. Sedangkan untuk tipe C dibatasi 25% – 35% dari berat binder. *Fly Ash* pada umumnya memberi dampak dalam *workability* dan biaya yang lebih ekonomis pada beton. Namun hal tersebut tidak mencukupi untuk meningkatkan daya tahan (*Durability*) untuk serangan sulfat, alkali-silika ekspansi dan juga *thermal cracking*. Untuk mencapai tujuan tersebut, maka dilakukan perkembangan dengan meningkatkan prosentase *fly ash*. Malhotra dan Mehta (2003) mengusulkan untuk menggunakan prosentase *fly ash* minimum 50% dari berat semen untuk diterapkan sebagai mix design dari beton HVFA. Hal tersebut sangat memungkinkan untuk menghasilkan *workability*, *ultimate strength*, dan *durability* yang tinggi.

Berdasarkan dari pengalaman di lapangan dan tes di laboratorium, beton HVFA jika dibandingkan dengan beton konvensional dapat disimpulkan sebagai berikut (Stefanus dan Howard, 2010) :

1. Lebih mudah dalam *flowability*, *pumpability*, dan *workability*.
2. Memiliki penyelesaian permukaan beton yang lebih cepat dan lebih baik.
3. Memiliki waktu *setting time* yang lebih lama.
4. Kekuatan awal beton dapat ditingkatkan pada umur 7 hari, dimana dapat dipercepat dengan mengubah pada *mix design* jika dibutuhkan untuk pembukaan bekisting dan pembebanan struktur pada awal umur beton.
5. Beton HVFA, penambahan kekuatannya terjadi antara umur 7 hari sampai 90 hari bahkan mampu melebihi 100% dari kekuatannya. Jadi tidak perlu dilakukan *overdesign* untuk mendapatkan suatu kekuatan yang tinggi.

6. Beton HVFA memiliki stabilitas dan ketahanan terhadap terjadinya retak pada beton, baik retak yang diakibatkan oleh *thermal shrinkage*, *autogenous shrinkage*, dan *drying shrinkage*.
7. Beton HVFA dengan waktu curing yang mencapai tiga sampai enam bulan memiliki ketahanan yang lebih tinggi terhadap *electrical* dan *chloride ion penetration* berdasarkan ASTM C1202.

#### 2.2.3.1 Spesifikasi *High Volume Fly Ash Concrete* (HVFAC)

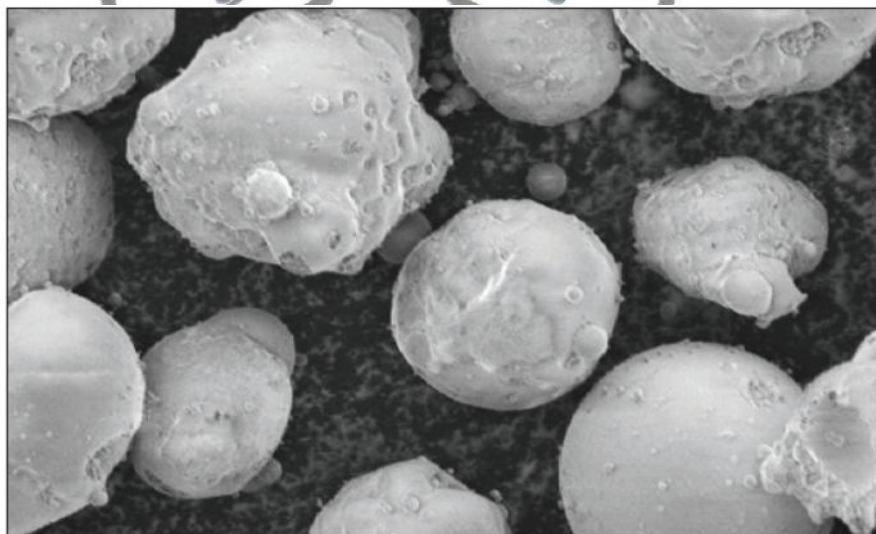
*Fly ash* atau biasa juga disebut abu terbang merupakan bahan buangan hasil sisa pembakaran batu bara dari pembangkit listrik. *Fly ash* didapatkan dari pengumpul mekanik yang memisahkan *fly ash* dari gas sisa pembakaran batu bara. Besar partikel *fly ash* antara 1-150 mikrometer yang lolos ayakan 45 mikrometer. Dalam perannya bersifat *pozzolan*, karena itu *fly ash* mulai dipertimbangkan untuk digunakan sebagai campuran atau bahkan pengganti semen.

*Fly ash* yang digunakan sebagai pengganti sebagian penggunaan semen pada beton dapat membuat beton lebih kuat, tahan lama, dan mengurangi dampak lingkungan. *Fly ash* itu sendiri memiliki kegunaan untuk meningkatkan kekuatan, memperlambat setting time, dan mengurangi panas hidrasi dari semen, sehingga kemungkinan terjadinya cracking dapat dikurangi. Selama ini terdapat 2 jenis *fly ash* yaitu *fly ash* tipe C dan *fly ash* tipe F. *Fly ash* tipe C dihasilkan dari pembakaran batu bara muda, sedangkan *fly ash* tipe F dihasilkan dari pembakaran batu bara antrasit. *Fly ash* tipe C memiliki karakteristik ringan dan berwarna lebih terang dari *fly ash* tipe F, Sedangkan *fly ash* tipe F berwarna lebih gelap dari *fly ash* tipe C. Selama ini, kebanyakan percobaan yang dilakukan menggunakan standar ASTM C618 yaitu *fly ash* tipe F dengan persentase 15%-20% dari berat total binder dan *fly ash* tipe C dengan persentase 25%-35% dari berat total binder pada beton. Menurut pertimbangan referensi dan beberapa pengalaman percobaan, dikatakan bahwa penggunaan *Fly ash* dengan kadar 50% bahkan lebih dari berat total binder dapat meningkatkan workability, kekuatan maksimum, dan ketahanan dari beton tersebut (Malhotra dan Mehta, 2003).



Malhotra dan Mehta (2003) mengatakan bahwa *fly ash* sebagai bahan pozzolanic yang digunakan bersamaan dengan semen memiliki persentase tertentu dalam pembuatan beton, dimana jika kadar *fly ash* 50% atau lebih dari berat total binder disebut *High Volume Fly Ash Concrete* (HVFAC).

Unsur silikat dan aluminat sebagai unsur dari *fly ash* yang reaktif akan bereaksi dengan kapur padam aktif ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) yang merupakan hasil sampingan dari proses hidrasi antara semen portland dan air menjadi kalsium silikat hidrat ( $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  atau “tobermorite”), sehingga mendapatkan hasil utama dari proses hidrasi  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  (tobermorite) tambahan. Karena dalam *High Volume Fly Ash Concrete* (HVFAC) menggunakan kadar *fly ash* tinggi, maka akan terjadi perubahan fungsi *fly ash* menjadi filler. Ukuran butiran *fly ash* ( $45\mu\text{m}$ ) yang lebih kecil dari pada butiran semen ( $75\mu\text{m}$ ) sehingga dapat menutup dari ruang kosong antar butiran semen dan beton bisa lebih kedap terhadap air. Dengan beton lebih kedap, maka *durability* dan *ultimate strength* dapat lebih meningkat. Butiran *fly ash* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.2



**Gambar 2.2.** Butiran *fly ash* (*SpecData\_FlyAsh* Holcim, 2006)

Dengan bentuk butir dari *fly ash* bulat maka gesekan atau friksi antar butir sangat kecil sehingga memiliki *flowability* tinggi dan akan lebih mudah dalam pengerjaan atau *workability* tinggi.

Pada penggunaannya, beton HVFA diharapkan membutuhkan biaya yang lebih murah dari beton konvensional, meningkatkan kekuatan, *workability*, *durability*, dan memperlambat setting time 2-3 jam sehingga dapat memberikan waktu yang lebih lama untuk pekerjaan pengecoran. Di sisi lain, beton HVFA ternyata juga memiliki kekurangan yaitu proses hardening yang lebih lama dibandingkan beton konvensional, sehingga membuat kita tidak bisa memperkirakan berapa lama waktu yang dibutuhkan untuk melepas bekisting dan melakukan curing pada beton tersebut.

#### 2.2.3.2 Kelebihan dan Kekurangan Beton *High Volume Fly Ash (HVFA)*

Beton *High Volume Fly Ash Concrete (HVFA)* memiliki beberapa kelebihan diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Beton HVFA lebih kedap air karena kapur bebas yang dilepas pada proses hidrasi akan terikat oleh silikat dan alumina aktif yang terkandung di dalam *fly ash* dan menambah pembentukan *silica gel*, yang berubah menjadi kalsium silikat hidrat yang berperan menutup pori-pori yang terbentuk akibat dibebaskannya  $\text{Ca(OH)}_2$ .
2. Mempermudah pengerjaan beton segar karena beton lebih unggul dalam *workability*, *flowability*, dan *pumpability*.
3. Jumlah air yang digunakan (FAS) lebih kecil, sehingga kekuatan beton akan meningkat.
4. *Fly ash* dalam volume tinggi dapat menurunkan panas hidrasi yang terjadi, sehingga dapat mencegah terjadinya retak pada beton, baik retak yang diakibatkan oleh *thermal shrinkage*, *autogenous shrinkage*, dan *drying shrinkage*.
5. Relatif dapat menghemat biaya karena akan mengurangi pemakaian semen (Hidayat, 1993).

Sedangkan beberapa kekurangan dari HVFAC antara lain sebagai berikut :

1. Beton *High Volume Fly Ash (HVFA)* kurang baik untuk pengerjaan beton yang memerlukan waktu pengerasan dan kekuatan awal yang tinggi, karena proses

pengerasan (*setting time*) dan penambahan kekuatan betonnya agak lambat pada umur beton kurang dari 28 hari.

2. Pengendalian mutu harus dilakukan karena kualitas *fly ash* tergantung pada proses pembakaran (suhu) serta jenis batubara.

#### 2.2.4 *Self Compacting Concrete*

Beton SCC adalah beton yang memiliki kemampuan untuk mengalir mengisi bekisting tanpa ataupun dengan sedikit bantuan alat. Beton SCC pertama kali diperkenalkan oleh Okamura dan Ozawa di Jepang tahun 1980an. Penelitian pertama ini bertujuan untuk mendapatkan bangunan yang bentuk geometrinya tidak dapat dibuat oleh beton normal. Beton SCC membutuhkan perilaku khusus dalam *admixture*nya, harus memperhatikan ukuran agregat dan komposisi antar agregat, pemakaian zat aditif agar dapat mencapai kekentalan tanpa menggunakan faktor air semen yang besar dan pemakaian *power powder* agar tidak terjadi segregasi. Pemanfaatan beton ini dapat mempermudah dan mempercepat proses pembuatan beton pracetak dan harga yang ditawarkan lebih murah karena dalam proses pembuatannya tidak memerlukan banyak tenaga kerja. Dengan pengaturan ukuran agregat beton ini juga dapat melewati tulangan yang sangat rapat dan tanpa memerlukan alat penggetar untuk memadat sehingga dapat membuat desain bangunan yang geometrinya sulit dibentuk. Pemakaian *superplasticizer* juga perlu dikontrol agar *viskositas* beton segar tetap terjaga.

Beberapa peneliti memberikan batasan parameter beton memadat mandiri yang berbeda. Nilai batasan tersebut umumnya mengacu kepada kebiasaan lembaga atau standar yang digunakan pada negara tempat melakukan pengujian. Tabel 2.1 memperlihatkan rangkuman beberapa batasan yang diambil dari berbagai sumber.

**Tabel 2.1.** Parameter untuk pengujian beton memadat mandiri

No	Jenis pengujian SCC	Data yang dicari	Parameter Pengujian
1	Papan pengaliran tanpa penghalang ( <i>flow table</i> )	$t_{500}$ , sec	2 – 5 (Siddque, 2001)
		Dimeter sebaran SCC, mm	700 (EN- 12350)
2	Uji papan pengaliran dengan penghalang ( <i>J-ring flow table</i> )	$t_{500}$ , sec	2 – 5 (Siddque, 2001)
		Dimeter sebaran SCC, mm	600 (EN- 12350)
3	Uji <i>L-box</i>	$t_{200}$ , sec	3 - 4 (As'ad, 2008)
		$t_{400}$ , sec	6 (As'ad, 2008)
		$h_1$ , mm	–
		$h_2$ , mm	–
		$h_2/h_1$	$\geq 0,8$ dan maks = 1 (Kumar, 2001)
4	<i>Box type test</i>	$h$ (ketinggian SCC setelah partition gate dibuka), mm	300 (Kumar, 2006)
5	<i>V-funnel test</i>	$t$ (waktu SCC keluar melewati lubang kecil pada V- <i>funnel</i> bagian bawah hingga habis), sec	6 – 12 (Siddque, 2001)

#### 2.2.4.1 Spesifikasi Self Compacting Concrete

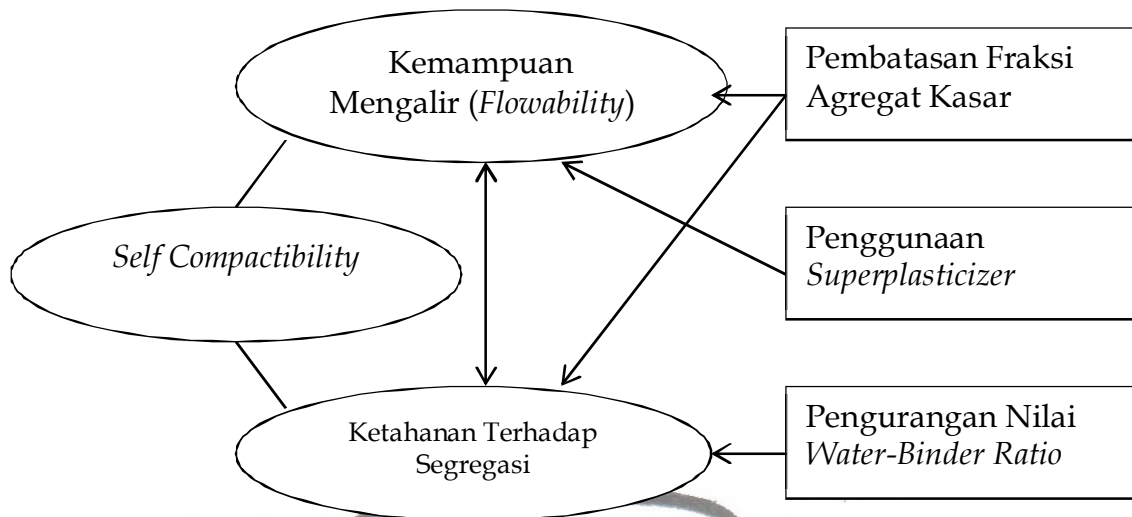
*Self Compacting Concrete* atau yang umum disingkat dengan istilah SCC adalah beton segar yang sangat plastis dan mudah mengalir karena berat sendirinya mengisi keseluruhan cetakan yang dikarenakan beton tersebut memiliki sifat-sifat untuk memadatkan sendiri, tanpa adanya bantuan alat penggetar untuk pemadatan. Beton SCC yang baik harus tetap *homogen*, *kohesif*, tidak *segregasi*, tidak terjadi *blocking*, dan tidak *bleeding*. Beton memadat mandiri pertama kali dikembangkan di Jepang pada tahun 1980-an sebagai upaya untuk mengatasi persoalan pengecoran komponen gedung artistik dengan bentuk geometri tergolong rumit bila dilakukan pengecoran beton normal. Riset tentang SCC masih terus dilakukan

hingga sekarang dengan banyak aspek kajian, misalnya ketahanan (*durability*), *permeabilitas* dan kuat tekan (*compressive strength*) (Juvas ,2004).

Spesifikasi dari Beton SCC antara lain adalah sebagai berikut :

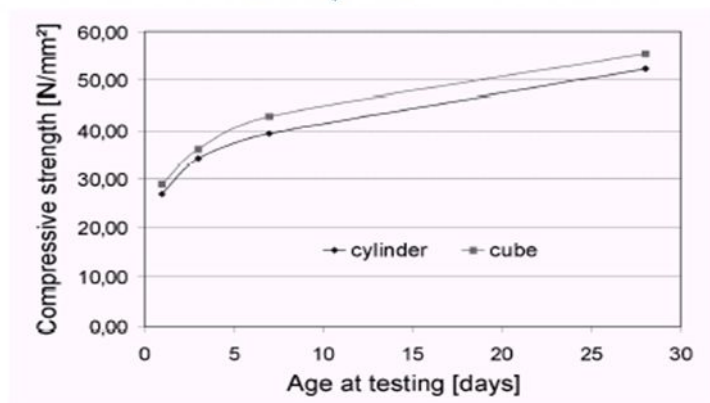
1. Agregat kasar yang digunakan adalah kurang lebih 50% volume total, agar mortar dapat melewati sela-sela dari agregat kasar yang kurang rapat tersebut. Dengan pembatasan jumlah agregat kasar ini diharapkan terjadi blok seminimal mungkin sehingga kemampuan aliran beton untuk melewati tulangan lebih maksimal (Himawan dan Darma, 2000).
2. Volume agregat halus ditetapkan 40% dari volume total mortar, yang bertujuan mengisi kekosongan dari agregat kasar. Apabila prosentase agregat halus kurang dari 40% maka porus dari beton akan lebih banyak, dan apabila prosentase agregat halus lebih dari 40% maka kuat tekan yang dihasilkan akan lebih kecil.
3. Rasio volume untuk air dan bahan pengikat ditetapkan antara 0,9 hingga 1 tergantung pada sifat pada bahan pengikatnya. Apabila Rasio volume untuk air dan bahan pengikat lebih dari (0,9-1) maka resiko kemungkinan adanya segregasi dan *bleeding* lebih tinggi. Dan Apabila Rasio volume untuk air dan bahan pengikat kurang dari (0,9-1) maka adukan beton segar memiliki *flowability* yang rendah dan tidak termasuk dalam *self compacting concrete*.
4. Dosis *superplasticizer* dan faktor air - bahan pengikat ditentukan setelahnya untuk mendapatkan pemadatan secara mandiri.





**Gambar 2.3.** Prinsip Dasar Proses Produksi *Self-Compacting Concrete* (Dehn dkk, 2000).

Menurut Dehn dan kawan-kawan (2000), perkembangan kuat tekan beton yang tergolong *self-compacting concrete* lebih cepat dibandingkan dengan beton normal yang menggunakan *fly ash* sebagai pozolan tetapi lebih lambat jika dibandingkan dengan beton normal yang tidak menggunakan pozolan, sehingga disarankan untuk menggunakan kuat tekan pada umur 56 hari sebagai tolok ukur pengujian. Hasil penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.4.



**Gambar 2.4.** Perkembangan Kuat Tekan SCC (Dehn dkk, 2000)

#### 2.2.4.2 Sifat *Self Compacting Concrete*

##### 1. Sifat Beton Segar *Self Compacting Concrete*

###### a. Kemampuan mengisi ruangan (*Filling Ability*)

*Filling Ability* merupakan ukuran dari tingkat kemampuan adukan beton untuk mengisi ruangan. Perbandingan bahan dan juga sifat bahan mempengaruhi kemampuan beton segar mengisi ruangan.

Unsur-unsur yang mempengaruhi sifat *Filling Ability* antara lain:

- 1) Ukuran agregat kasar maksimal 20 mm.
- 2) Agregat kasar yang digunakan adalah 50% volume total, agar mortar dapat melewati sela-sela dari agregat kasar yang kurang rapat tersebut.
- 3) Penggunaan *superplastiziser* yang memadai dengan sangat ketat mengatur komposisi agregat pada campuran.
- 4) Rasio air-semen (*w/c-ratio*) yang rendah dengan mengendalikan volume agregat yang dikombinasikan dengan agregat pengisi berukuran sekitar 0,125 mm menyebabkan campuran beton ini tidak mudah mengalami segregasi.
- 5) Pemakaian butir batuan yang bulat dapat mempermudah pengerjaan adukan

###### b. Pengaliran (*flowability*)

*Flowability* pada SCC dapat menunjukkan bahwa beton tersebut mempunyai pengaliran yang baik atau tidak. Pada SCC *flowability* dapat diuji menggunakan uji *flow table* dan *v-funnel*. Pengujian *flow table* tanpa serat disyaratkan waktu yang diperlukan beton untuk mencapai diameter sebaran sebesar 500 mm ( $t_{500}$ ) adalah 2-5 detik dan syarat diameter sebaran adalah 700 mm, sedangkan pada pengujian *v-funnel* tanpa serat waktu yang diperlukan beton untuk melewati celah hingga habis adalah 6-12 detik (Siddique,2001).

###### c. Kemampuan melewati tulangan (*passingability*)

Kinerja *self compacting concrete* tidak hanya dilihat dari segi *flowability* saja, *passingability* dari SCC juga perlu diperhatikan. *Passingability* dari SCC

dapat diketahui melalui pengujian *J-Ring flow table*, *L-Box* dan *Box Type*. Perincian syarat pengujiannya adalah sebagai berikut:

- 1) *Slump flow test* Alat uji ini terdiri dari papan aliran dengan permukaan licin berukuran 80 cm x 80 cm. Papan dilengkapi dengan kerucut pengarah tuangan beton segar setinggi 30 cm dengan diameter atas 10 cm dan diameter bawah 20 cm.
- 2) Pengujian *J-Ring flow table* tanpa serat syarat waktu yang diperlukan beton untuk melewati tulangan hingga diameter sebaran sebesar 500 mm ( $t_{500}$ ) adalah 2-5 detik dan syarat diameter sebaran adalah 600 mm (Siddique, 2001).
- 3) Pengujian *L-Shape Box Test* tanpa serat syarat waktu yang diperlukan untuk mencapai  $t_{200}$  adalah 3-4 detik, dan untuk mencapai  $t_{400}$  adalah 6 detik (As'ad, 2006). Perbandingan ketinggian ( $h_2/h_1$ ) adalah  $\geq 0,8$  (Kumar, 2006).
- 4) Pengujian *Box type* tanpa serat syarat ketinggian permukaan beton setelah *partition gate* dibuka adalah 300 mm (Kumar, 2006).
- 5) *V-funnel test : Flowability* beton segar dapat diuji dengan V-funnel test, dengan cara mengukur waktu pengaliran setelah funnel diisi sekitar 12 liter beton segar.

d. Ketahanan terhadap segregasi (*segregation resistance*)

*Segregation* merupakan kecenderungan dari butir-butir kerikil untuk memisahkan diri dari campuran adukan beton. Campuran beton yang kelebihan air semakin memperbesar terjadinya segregasi, dimana material yang berat mengendap ke dasar beton segar dan material yang lebih ringan akan menuju ke permukaan. Hal ini dapat mengakibatkan adanya lubang-lubang pada beton, beton menjadi tidak homogen, permeabilitas berkurang, dan juga kurang awet. Dengan penggunaan *superplasticizer* maka *water/binder* dapat diperkecil, dalam takaran tertentu segregasi dapat dihilangkan yaitu dengan *trial mix design*.

Beberapa pengujian lain dari beton segar yang dipaparkan oleh Tattersall (1983) adalah sebagai berikut :

1. *Filling Box Test*, untuk mengetahui kemampuan beton segar dalam mengisi tulangan dan menghindari segregasi.
2. *Wet Sieving stability Test*, untuk mengetahui rasio segregasi beton segar.
3. *Penetration Test for Segregation*, untuk mengukur resistensi penetrasi beton yang bersifat cair dan pemadatan mandiri.

e. Pemisahan air (*bleeding*)

*Bleeding* merupakan kecenderungan air campuran untuk naik ke atas (memisahkan diri) pada beton segar yang baru saja dipadatkan. Air naik ke atas sambil membawa semen dan butir halus pasir. Setelah beton mengeras material yang naik akan tampak seperti suatu lapisan tipis yang dikenal sebagai *laitance*. *Bleeding* biasanya terjadi pada campuran beton yang kelebihan air atau campuran adukan beton dengan nilai *slump* tinggi.

2. Sifat Beton Padat *Self Compacting Concrete*

a. Kekuatan (*strength*)

Kekuatan beton padat meliputi kekuatan tekan dan kekuatan tarik. Faktor air semen (FAS) sangat mempengaruhi kuat tekan beton. Semakin kecil FAS, sampai batas tertentu semakin tinggi kuat tekan beton. Kekuatan akan sesuai dengan yang direncanakan bila pada campuran beton tersebut menggunakan semen portland dengan kekuatan yang sesuai dengan persyaratan dan proporsi campuran dengan perencanaan yang tepat. Kekuatan beton akan semakin meningkat dengan bertambahnya umur beton karena proses hidrasi semen yang ada dalam adukan beton akan terus berjalan walaupun lambat.

b. Ketahanan (*durability*)

Ketahanan beton dikatakan baik apabila dapat bertahan lama dalam kondisi tertentu tanpa mengalami kerusakan selama bertahun-tahun yang disebabkan faktor dari luar, erosi kembang dan susut akibat basah atau kering yang silih berganti dan pengaruh bahan kimia, dan faktor dari dalam yaitu akibat reaksi agregat dengan senyawa alkali.

c. Susut (*Shrinkage*)

Pada *Self Compacting Concrete* memiliki tingkat susut (*Shrinkage*) yang rendah dikarenakan pada adukan beton segar faktor air-semen sangat rendah sehingga pada waktu mengeras, ruangan-ruangan dari penguapan air lebih kecil, dengan demikian beton dapat lebih kuat menahan susut.

#### 2.2.4.3 Kelebihan dan Kekurangan *Self Compacting Concrete*

1. Kelebihan dari *Self Compacting Concrete* :

a. Segi Durabilitas

1. Meningkatkan homogenitas dari beton
2. Dapat membungkus tulangan dengan baik
3. Porositas dari matrik beton yang rendah
4. *No Carbonation, no chloride ingress*

b. Segi Produktivitas

1. Pengecoran yang cepat
2. Pemompaan yang lebih mudah
3. Pekerjaan pemadatan tidak perlu dilakukan lagi

c. Segi Tenaga Kerja

1. Human error akibat pemadatan yang kurang sempurna dapat dihilangkan
2. Angka kecelakaan tenaga kerja dapat diperkecil
3. Tidak ada polusi suara akibat vibrator
4. Tidak terjadi *Hand Arm Vibration Syndrom (HAVS)*
5. Tidak terjadi *White Fingers* akibat gangguan peredaran darah

2. Kekurangan *Self Compacting Concrete*

- a. Dari segi biaya *Self Compacting Concrete* lebih mahal dari pada beton konvensional, salah satunya penggunaan *superplasticizer*
- b. Pembuatan cetakan beton harus diperhatikan karena mudah terjadi kebocoran akibat sangat encernya campuran beton.



### 2.2.5. *High Volume Fly Ash Self-Compacting Concrete (HVFA SCC)*

*High volume fly ash self-compacting concrete (HVFA SCC)* merupakan perpaduan dari teknologi beton HVFA dan SCC. HVFA SCC merupakan beton dengan kadar *fly ash* sebagai pengganti semen mencapai lebih dari 50% dan memiliki sifat-sifat beton segar sama seperti SCC biasa. Pemakaian *fly ash* sebagai bahan pengganti semen minimum 50% dari berat *binder* memiliki berbagai keunggulan untuk membuat beton segar memiliki sifat-sifat SCC. Bentuk butiran *fly ash* yang bulat akan meningkatkan *workability* beton segar sehingga kemampuan beton untuk mengalir akan lebih baik dengan penggunaan faktor air semen yang lebih kecil.

#### 2.2.5.1 Bahan Penyusun *High Volume Fly Ash – Self Compacting Concrete (HVFA-SCC)*

Bahan penyusun *HVFA – SCC* agak berbeda. Pembuatan *HVFA – SCC* diperlukan agregat, semen dan air dengan komposisi tertentu dengan *mineral admixture* dan *chemical admixture* untuk mendapatkan beton yang *flowable* dan *compactable*. Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat *HVFA – SCC*, diuraikan sebagai berikut:

##### 1. Bahan Pengikat:

###### a. Semen

Semen *portland* adalah bahan konstruksi yang paling banyak digunakan dalam pekerjaan beton. Menurut SNI-2049-2004, semen *portland* didefinisikan sebagai semen hidrolik yang dihasilkan dengan menggiling *clinker* yang terdiri dari kalsium silikat hidrolik, yang umumnya mengandung satu atau lebih bentuk kalsium sulfat sebagai bahan tambahan yang digiling bersama-sama dengan bahan utamanya. Untuk mendapatkan *workability* yang tinggi, dapat dilakukan dengan meningkatkan volume pasta semen. Peningkatan volume pasta diperoleh dengan memberikan bahan mineral pada semen seperti *fly ash*, *silica fume*, *limestone*, dan sebagainya. Bahan-bahan tersebut berguna untuk meningkatkan sifat mekanis dan

kimiawi serta umur beton. Jumlah semen dan bahan tambahannya berkisar antara 425 – 625 kg/m<sup>3</sup>.

#### b. *Fly Ash*

*Fly ash* adalah material yang berasal dari abu pembakaran batu bara yang tidak terpakai. Pembakaran batu bara kebanyakan digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap. Produk limbah dari PLTU Cilacap tersebut mencapai 1 juta ton per tahun. Material ini mempunyai kadar bahan semen yang tinggi dan mempunyai sifat pozzolanik. Kandungan *fly ash* sebagian besar terdiri dari silikat dioksida (SiO<sub>2</sub>), alumunium oksida (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), besi (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), dan kalsium (CaO), serta magnesium, pottasium, sodium, titanium, dan sulfur dalam jumlah yang lebih sedikit. Sebagian besar komposisi kimia dari *fly ash* tergantung dari tipe batu bara. Menurut ASTM C618-86, terdapat dua jenis *fly ash*, yaitu kelas F dan C. Kelas F dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis antrasit dan bituminous, sedangkan kelas C dari batu bara jenis lignite dan subituminous. Persyaratan Kandungan Kimia dan fisika *Fly Ash* Berdasarkan ASTM C618 – 96 disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Persyaratan Kandungan Kimia *Fly Ash*

Senyawa	Kelas campuran mineral		
	F	N	C
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min, %	70	70	50
SO <sub>3</sub> , maks, %	4	5	5
Moisture content, maks, %	3	3	3
Loss of Ignition, maks, %	10	6	6
Alkali, Na <sub>2</sub> O, maks, %	1.5	1.5	1.5

*Fly ash* yang dipakai untuk penelitian ini adalah *fly ash* yang di peroleh dari PLTU Cilacap. Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Balai Teknik Kesehatan Lingkungan (BTKL) dan Penanggulangan Penyakit Menular (PPM) tentang kandungan kimia yang terdapat dalam *fly ash* dari PLTU Cilacap. Dari hasil analisis parameter kimia tersebut, *fly ash* dari PLTU Cilacap tergolong dalam *fly ash* tipe C yang ditampilkan dalam Tabel 2.3. sebagai berikut :

Tabel 2.3. Parameter Kimia *Fly Ash* PLTU Cilacap.

Parameter	Kelas
	C
Silicon dioxide (SiO <sub>2</sub> ) + aluminum oxide (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + iron oxide (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), min, %	61,51
Sulfur trioxide (SO <sub>3</sub> ), max, %	0,36
Moisture content, max, %	0,16
Loss on ignition, max, %	0,53

Sumber : BTKL dan PPM Yogyakarta (2011)

Alasan penggunaan *fly ash* pada *HVFA – SCC* adalah :

1. Ramah lingkungan karena memanfaatkan limbah yang beracun dan mengurangi penggunaan semen.
2. Dapat menggantikan semen dengan biaya lebih murah.
3. Dapat mengurangi resiko terjadinya bleeding, segregasi, dan penyusutan beton.
4. Kehalusan dan bentuk partikel *fly ash* yang bulat dapat meningkatkan workability.
5. Mampu meningkatkan kepadatan beton.

### 3. Agregat Kasar

Komposisi agregat kasar pada beton konvensional menempati 70-75% dari total volume beton. Sedangkan dalam *HVFA – SCC*, penggunaan agregat kasar lebih sedikit, yaitu dibatasi jumlahnya maksimal 50 % dari total volume beton supaya bisa mengalir dan memadat sendiri tanpa alat pemadat. Selain itu pembatasan fraksi agregat kasar dimaksudkan untuk meningkatkan ketahanan terhadap segregasi. Sedangkan ukuran maksimum agregat kasar 20 mm dengan pertimbangan jarak bersih minimal antar tulangan, dan kemampuan mengalir. Untuk mendapatkan beton dengan kemampuan memadat dengan baik, lebih disarankan agar menggunakan agregat dengan berat jenis tinggi (berat).

#### 4. Agregat halus

Agregat halus yang digunakan lebih banyak daripada beton konvensional, yaitu dengan volume agregat halus lebih besar 40 % dari volume mortar, dan harus lebih besar 50 % dari berat total agregat, tetapi lebih kecil 50 % dari volume pasta. Pasta terbentuk dari campuran semen ditambah air dan udara, sedangkan mortar dibentuk dari pasta dan agregat.

#### 5. Air

Faktor air semen sangat berpengaruh pada beton segar dan setelah mengeras. Sedangkan penggunaan air pada *HVFA – SCC* lebih sedikit dibanding beton konvensional yaitu dengan FAS berkisar antara 0,28 – 0,42 atau dibatasi sebesar  $\pm 200 \text{ liter/m}^3$ . Pengurangan penggunaan air ini bertujuan untuk mencegah terjadinya segregasi.

#### 6. Bahan campur (*admixture*)

Pada *HVFA – SCC*, diperlukan dosis *superplasticizer* yang tinggi. Pada pembuatan *HVFA – SCC* ini digunakan *superplasticizer* dengan nama dagang *Sika Viscocrete-10*. *Sika Viscocrete-10* adalah bahan tambah kimia (*chemical admixture*) yang melarutkan gumpalan-gumpalan dengan cara melapisi pasta semen sehingga semen dapat tersebar dengan merata pada adukan beton dan mempunyai pengaruh dalam meningkatkan *workability* beton sampai pada tingkat yang cukup besar. Bahan ini digunakan dalam jumlah yang relatif sedikit karena sangat mudah mengakibatkan terjadinya *bleeding*. *Superplasticizer* dapat mereduksi air sampai 40% dari campuran awal. Beton berkekuatan tinggi dapat dihasilkan dengan pengurangan kadar air, akibat pengurangan kadar air akan membuat campuran lebih padat sehingga pemakaian *superplasticizer* sangat diperlukan untuk mempertahankan nilai slump yang tinggi. Keistimewaan penggunaan *superplasticizer* dalam campuran pasta semen maupun campuran beton antara lain:

- a. Menjaga kandungan air dan semen tetap konstan sehingga didapatkan campuran dengan *workability* tinggi.

- b. Mengurangi jumlah air dan menjaga kandungan semen dengan kemampuan kerjanya tetap sama serta menghasilkan faktor air semen yang lebih rendah dengan kekuatan yang lebih besar.
- c. Mengurangi kandungan air dan semen dengan faktor air semen yang konstan tetapi meningkatkan kemampuan kerjanya sehingga menghasilkan beton dengan kekuatan yang sama tetapi menggunakan semen lebih sedikit.
- d. Sedikit udara yang masuk. Penambahan 1% udara kedalam beton dapat menyebabkan pengurangan strength rata-rata 6%. Untuk memperoleh kekuatan yang tinggi, diharapkan dapat menjaga "air content" didalam beton serendah mungkin. Penggunaan *superplasticizer* menyebabkan sedikit bahkan tidak ada udara masuk kedalam beton.

Tidak adanya pengaruh korosi terhadap tulangan. Secara umum, partikel semen dalam air cenderung untuk berkoheisi satu sama lainnya dan partikel semen akan menggumpal. Dengan menambahkan *superplasticizer*, partikel semen ini akan saling melepaskan diri dan terdispersi. Dengan kata lain *superplasticizer* mempunyai dua fungsi yaitu, mendispersikan partikel semen dari gumpalan partikel dan mencegah kohesi antar semen. Fenomena dispersi partikel semen dengan penambahan *superplasticizer* dapat menurunkan viskositas pasta semen, sehingga pasta semen lebih mengalir. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan air dapat diturunkan dengan penambahan *superplasticizer*. Adapun spesifikasi (*technical data*) dari *Sika Viscocrete 10* dapat dilihat pada Tabel 2.4

Tabel 2.4 Data Teknis *Sika Viscocrete 10*

Bentuk	Cair
Warna	<i>Pale Straw</i>
Kerapatan relatif @ 20°C	1,06
Kandungan material kering %	30
Dosis % berat semen	0,2-1,5
Ph	4,5
<i>Water Soluble Chloride Content %</i>	<0,1 <i>Chloride free</i>
<i>Equivalent Sodium Oxide as Na<sub>2</sub>O</i>	0,30

Sumber: [www.sika.co.id](http://www.sika.co.id)

*commit to user*



### 2.2.5.2 Rancang Campur *High Volume Fly Ash – Self Compacting Concrete* (HVFA-SCC)

Pada setiap pembuatan beton memadat mandiri (SCC) diperlukan rancang campur bahan penyusunnya (*mix design*). Terdapat berbagai macam aturan rancang campur beton memadat mandiri (SCC) yang saat ini digunakan di dunia konstruksi. Dari berbagai macam metode rancang campur tersebut dipilihlah salah satu metode rancang campur yang nantinya digunakan sebagai acuan dalam mendesain rancang campur beton memadat mandiri agar dapat mencapai kriteria yang diinginkan yaitu kemampuan mengalir (*flowability*) dan resistensi terhadap segregasi yang tinggi. Kriteria tersebut dapat diperoleh dengan cara mengikuti ketentuan-ketentuan umum dari metode rancang campur beton memadat mandiri (SCC) yaitu:

1. Agregat kasar yang digunakan adalah 50% volume total.
2. Volume agregat halus ditetapkan hanya 40% dari volume total mortar.
3. Rasio volume untuk air dan *powder* (*water/powder ratio*) ditetapkan antara 0,9 hingga 1 tergantung pada sifat *powder* dan dosis dari *superplasticizer*.

Saat dilakukan penambahan *fly ash* hingga kadar volume tinggi pada rancang campur beton memadat mandiri (SCC), maka kemampuan mengalir (*flowability*) dari campuran semakin meningkat. Kadar air yang digunakan menjadi berkurang dari kadar air awal yang telah direncanakan pada keadaan sebelum ditambahkan *fly ash*. Sehingga jika kadar air awal tersebut digunakan sepenuhnya dalam campuran pada keadaan setelah ditambahkan *fly ash* hingga kadar volume tinggi, maka campuran tersebut akan mengalami *bleeding*. Modifikasi kadar air pada rancang campur perlu dilakukan untuk mendapatkan kemampuan mengalir (*flowability*) yang setara saat sebelum dilakukan penambahan *fly ash* dengan kadar volume tinggi dan tidak terjadi *bleeding* pada campuran.

### 2.2.6 Susut (*Shrinkage*)

Fenomena susut pada beton adalah berkurangnya volume beton akibat proses pengeringan dan fenomena deformasi jangka panjang beton yang disebabkan oleh adanya perubahan volume karena menguapnya air dari rongga-rongga mikro struktural beton sebagai akibat adanya proses hidrasi selama proses pengikatan beton.

Susut juga diartikan berkurangnya volume beton seiring penambahan waktu setelah proses pengerasan beton. Pengurangan ini terjadi akibat perubahan muatan campuran beton dan perubahan fisika-kimia, yang terjadi tanpa dipengaruhi gaya tekan yang timbul akibat beban luar, sehingga dapat digambarkan sebagai berkurangnya dimensi strain (in/in atau m/m) dalam kondisi kelembapan relative dan temperature yang konstan.

Berdasarkan pada mekanismenya, susut pada beton terdiri dari:

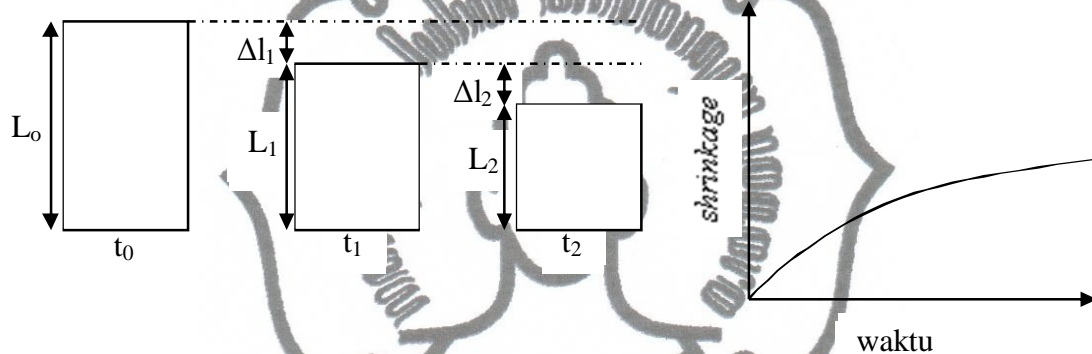
1. Susut plastis, terjadi selama beberapa jam pertama sesudah pengecoran beton segar pada cetakan.
2. Susut *autogenous*, terjadi akibat penyusutan air dari pori-pori kapiler oleh partikel semen dan akan terjadi pada umur awal beton saat proses hidrasi semen.
3. Susut kering, terjadi setelah beton mencapai bentuk akhirnya dan proses hidrasi pasta semen telah selesai.
4. Susut karbonasi, terjadi akibat karbonasi dari calcium hidroksida pada beton secara normal berlangsung pada permukaan beton.

### 2.2.7 Prinsip Pengukuran Susut (*Shrinkage*)

Pada dasarnya, besar susut pada beton dapat diketahui dengan pengukuran perubahan bentuk dari beton tersebut pada benda uji di bawah kondisi kering tanpa dipengaruhi beban. Menurut ASTM C 596-96, *drying shrinkage* adalah perubahan panjang dari benda uji selama periode tertentu, dimana perubahan panjang itu disebabkan bukan karena gaya eksternal melainkan akibat evaporasi. *Drying shrinkage* merupakan hasil pengurangan dari *total shrinkage* oleh

*autogenous shrinkage*. *Autogenous shrinkage* yaitu susut pada beton yang disebabkan oleh *self-desiccation* yaitu berkurangnya air pori karena dikonsumsi semen untuk hidrasi (Kayali et al, 2001). *Autogenous shrinkage* diukur pada specimen yang tertutup/diselimuti.

Pada saat beton serat mengeras dan menyusut, retak yang sangat kecil akan berkembang. Pengukuran susut kering dan susut *autogenous* pada beton dilakukan dengan cara membandingkan antara selisih panjang awal dan panjang akhir dengan panjang mula-mula benda uji. Berikut ini Gambar 2.5. menjelaskan hubungan penyusutan terhadap waktu.



waktu	Panjang	Perubahan panjang dari $t_0$	<i>shrinkage</i>
$t_0$	$L_0$	0	0
$t_1$	$L_1$	$L_0 - L_1$	$(L_0 - L_1) / L_0$
$t_2$	$L_2$	$L_0 - L_2$	$(L_0 - L_2) / L_0$

**Gambar 2.5.** Hubungan penyusutan terhadap waktu

### 2.2.8 Susut Kering (*Drying Shrinkage*)

Susut kering beton terjadi setelah beton mencapai bentuk akhirnya dan proses hidrasi pasta semen telah selesai. Susut kering beton adalah berkurangnya volume elemen beton jika terjadi kehilangan uap air karena penguapan. Penguapan ini menghilangkan air pori, sehingga mengakibatkan adanya tegangan kapiler yang menyebabkan dinding-dinding kapiler tertarik dan volume beton menyusut. Beton akan terus menerus mengalami susut kering dalam jangka panjang bahkan sampai

bertahun-tahun sampai air yang terkandung di dalam beton benar-benar habis menguap.

#### 2.2.8.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Besarnya Susut Kering (*Drying Shrinkage*)

Menurut (Nawy, 2001) faktor-faktor yang mempengaruhi besarnya susut adalah :

a. Semen atau Komposisi Semen

Sifat-sifat semen sebenarnya mempunyai pengaruh yang kecil terhadap susut pada beton. Kehalusan butir semen mempunyai efek pengekangan yang sama dengan bahan batuan terhadap susut beton. Semen yang kapurnya kurang baik dapat menimbulkan susut yang besar. Susutan beton yang dibuat dari semen aluminium kadar tinggi (*aluminous cement*) besarnya sama dengan jika menggunakan semen biasa (*portland cement*), hanya saja terjadi penyusutan lebih cepat.

b. Rasio Air Semen

Semakin tinggi rasio air semen, maka semakin tinggi pula susut yang terjadi pada beton.

c. Agregat

Sifat fisis dari agregat sangat berpengaruh dalam proses susut. Hal ini disebabkan karena kenyataan bahwa agregat dapat memperkuat pasta semen dan menahan penyusutan beton. Beton dengan modulus elastisitas tinggi atau dengan permukaan kasar akan lebih dapat menahan proses susut. Selain itu, derajat pengekangan suatu beton ditentukan juga oleh jumlah agregat dalam adukan beton. Semakin banyak jumlah agregat dalam adukan beton, semakin kecil pula kemungkinan terjadinya proses susut pada beton itu sendiri. Beton dengan *workability* rendah yang mengandung banyak agregat ternyata memberikan susutan yang rendah dibandingkan dengan beton dengan *workability* tinggi.

d. Jumlah Kandungan Air dalam Adukan Beton

Jumlah kandungan air dalam adukan beton mempengaruhi besarnya susut, yaitu mengurangi volume beton yang terkekang. Susut beton diketahui berbanding lurus dengan jumlah kandungan air dalam adukan beton. Dengan demikian jumlah air yang digunakan dalam campuran beton sebaiknya sebanyak yang dibutuhkan guna mencapai *workability* serta konsistensi yang diinginkan (pengadukan, pencetakan, dan pemadatan). Air berfungsi untuk membuat campuran menjadi plastis seperti yang dibutuhkan oleh campuran beton itu sendiri.

e. Rawatan Keras Beton

Susut umumnya berlangsung dalam jangka waktu yang lama. Tetapi sebagian dari waktu yang panjang tersebut, susut yang terjadi mungkin disebabkan oleh adanya proses pengarbonisasian beton. Besarnya susutan bertambah sesuai dengan berjalannya waktu.

f. Nilai Banding Antara Volume dan Muka Beton

Ukuran beton (dimensi) mempengaruhi besarnya susut pada beton. Karena susut disebabkan oleh penguapan kebasahan muka beton, maka beton yang mempunyai nilai banding antara volume / muka rendah akan mempunyai susutan-susutan lebih besar dan lebih cepat dibandingkan dengan beton yang mempunyai nilai banding tinggi.

g. Ukuran elemen beton

Baik laju maupun besar total susut berkurang apabila volume elemen beton semakin besar. Namun durasi susut akan lebih lama untuk komponen struktur yang lebih besar karena lebih banyak waktu yang dibutuhkan dalam pengeringan untuk mencapai pengeringan daerah dalam. Mungkin saja satu tahun dibutuhkan untuk proses pengeringan pada kedalaman 10 *in* dari permukaan yang di ekspos, dan 10 tahun untuk mulai pada 24 *in* di bawah permukaan yang di ekspos.



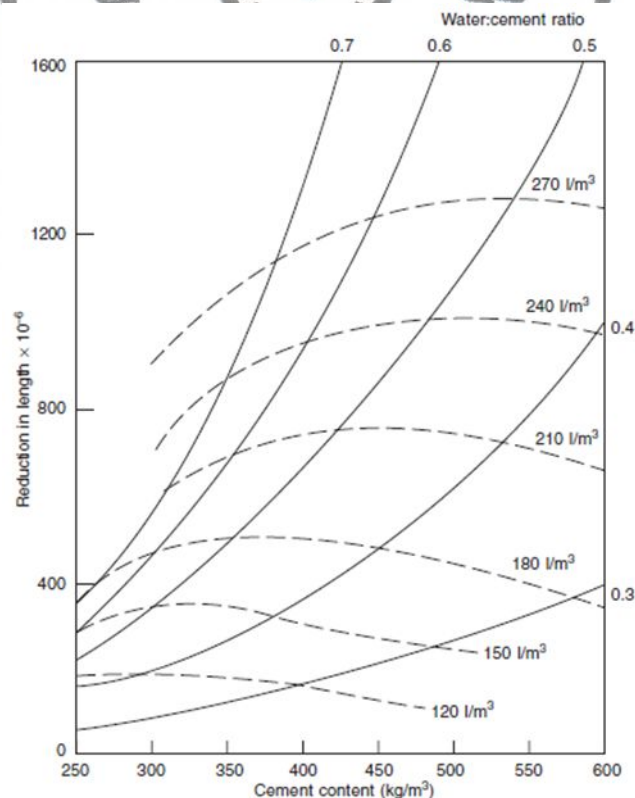
h. Bahan Tambah Adukan Beton

Bahan tambah digunakan untuk mengurangi penggunaan air dan mengekang air dalam adukan beton. Pemakaian bahan tambah jenis *polymer* menampakkan susutan 98%-112% dari beton terkontrol.

i. Kondisi Kelembaban Lingkungan Sekitar

Kondisi relatif pada lingkungan sekitar sangat mempengaruhi besarnya susut. Laju penyusutan lebih kecil pada kelembaban relatif yang lebih tinggi. Temperatur lingkungan juga merupakan faktor. Itu sebabnya susut menjadi stabil pada temperatur rendah.

Suatu rasio air-semen yang rendah akan membantu mengurangi susut akibat pengeringan dengan menjaga volume air yang dapat hilang pada suatu batas minimum. Grafik hubungan antara susut kering dengan fas dapat dilihat pada Gambar 2.6.

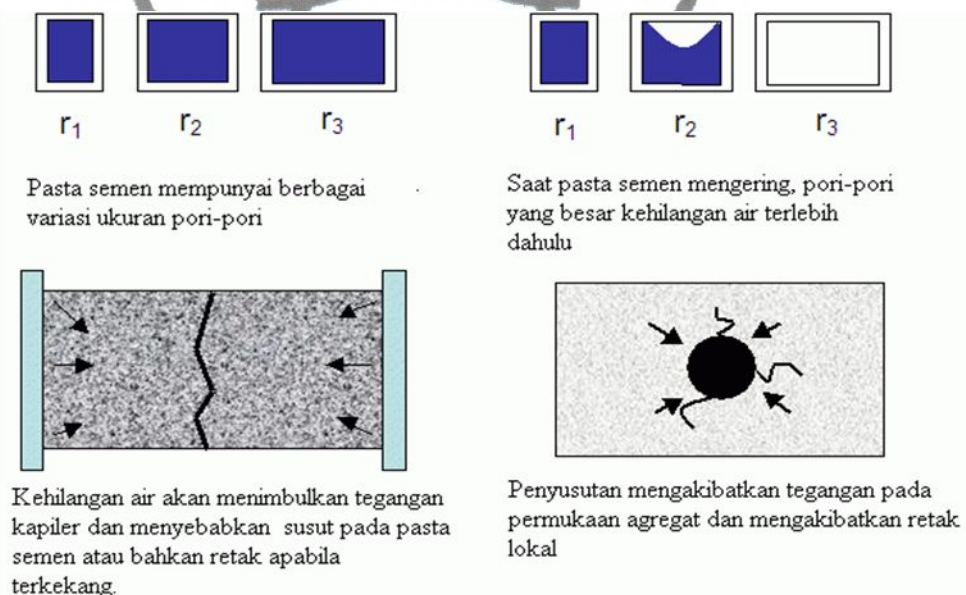


**Gambar 2.6.** Hubungan antara susut kering dengan fas. (Newman dan Choo, 2003)

### 2.2.8.2 Mekanisme Terjadinya Susut Kering (*Drying Shrinkage*)

Berikut adalah mekanisme terjadinya penyusutan dalam beton:

- a. Sifat dasar yang tidak stabil dari hasil pembentukan awal kalsium silikat hidrat pada penyusutan saat terjadi proses pengeringan. Sifat yang tepat dan terperinci dari mekanisme ini sukar dimengerti dan merupakan sesuatu yang bersifat permanen dan tidak dapat diubah.
- b. Dalam pasta semen terdapat pori besar dan kecil. Mula-mula pori yang terdapat dalam beton terisi penuh air tetapi dengan bertambahnya umur beton, maka air tersebut akan menguap keluar dari beton. Air yang pertama menguap adalah air yang terdapat dalam pori yang besar. Berlangsung sampai air yang ada pada pori besar habis sehingga menyebabkan adanya tegangan kapiler yang cukup untuk menimbulkan susut pada beton. Setelah itu air kapiler beton yang lebih kecil dan lebih halus secara berangsur-angsur akan mulai menguap. Kehilangan air dari kapiler kecil inilah yang menyebabkan terjadinya susut. Mekanisme susut ini akan dijelaskan pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7.** Mekanisme susut

- c. Luas permukaan dari sistem koloid pasta semen cukup luas, sehingga air yang terserap di permukaan akan **mempengaruhi** keseluruhan sifat sistem koloid

tersebut. Ketika air menguap maka terjadi perubahan energy di dalam system koloid silikat hidrat. Perubahan energi inilah yang menyebabkan terjadinya susut.

#### 2.2.8.3 Efek Susut Kering (*Drying Shrinkage*) pada Struktur

Dampak yang ditimbulkan susut pada struktur bangunan memang tidak terlihat secara langsung karena perkembangan penyusutan terjadi sangat lambat, tetapi dalam jangka waktu lama akan berpotensi menyebabkan deformasi struktur. Dampak lain yang timbul adalah terjadinya keretakan pada dinding atau pada beton. Hal ini dikarenakan beton menjadi sangat lemah dalam menahan peningkatan tegangan pori pada beton.

#### 2.2.8.4 Prediksi Susut Kering (*Drying Shrinkage*)

Perkiraan nilai susut pada masa yang akan datang sangat penting digunakan dalam merencanakan umur dan daya tahan suatu struktur bangunan. Perlu diadakan pengukuran nilai susut dalam jangka pendek. Metode yang paling tepat adalah dengan mengekstrapolasi nilai *ultimate shrinkage* dari pengukuran susut jangka pendek.

Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan untuk memperkirakan nilai susut beton. Diantaranya adalah ACI 209R-92 dan CEB-FIP 1990. Kemajuan dalam memperkirakan dapat dicapai dengan menggunakan nilai susut yang diteliti dari pengujian jangka pendek (28 hari) untuk memperkirakan susut jangka panjang. ACI 209R-92 mengusulkan untuk memprediksi susut jangka panjang dari data-data jangka pendek yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2.

$$\epsilon_s = \frac{t}{35} \cdot \epsilon_s \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan:

$\epsilon_s$  = nilai susut kering umur t

$\epsilon_s$  = besar *ultimate shrinkage*

*commit to user*

$t$  = umur pengujian ( hari )

CEB-FIP 1990 mengusulkan untuk memprediksi susut jangka panjang dari data-data jangka pendek yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3.

$$\epsilon_s = \epsilon_{sh} + \beta_s \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

$$\beta_s = \frac{\epsilon_s - \epsilon_{sh}}{350 - t}$$

Dengan:

$\epsilon_s$  = nilai susut kering umur  $t$

$\epsilon_{sh}$  = koefisien susut kering (*ultimate shrinkage*)

$\beta_s$  = koefisien pertambahan susut kering terhadap waktu

$t$  = umur pengujian ( hari )

= umur susut kering mulai diukur

$H$  =  $2.A_c/u$

$A_c$  = luas benda uji (mm)

$u$  = keliling benda uji (mm)

### 2.2.9 Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*)

*Autogenous shrinkage* yaitu susut pada beton yang disebabkan oleh *self-desiccation* yaitu berkurangnya air pori karena dikonsumsi semen untuk hidrasi (Kayali et al, 2001). *Autogenous shrinkage* diukur pada specimen yang tertutup/diselimuti. Bila pengukuran dilakukan pada lingkungan kering akan diperoleh total *shrinkage* yang merupakan jumlah dari besarnya *drying shrinkage* dan *autogenous shrinkage*. Besarnya *autogenous shrinkage* dapat diukur dengan menggunakan papan percobaan dengan alat *micrometer gauge* atau *dial gauge* pembacaan regangan mencapai  $10 \times 10^{-4}$ , atau dengan alat *extensometer*.

Pada beton normal besarnya *autogenous shrinkage* tidak signifikan jika dibandingkan *drying shrinkage*, tetapi pada beton mutu tinggi dengan rasio air

semen yang sangat rendah, jumlah total dari *autogenous shrinkage* dapat mencapai 700 microstrain (Kristiawan, 2002).

#### 2.2.9.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Besarnya Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*)

##### a. Semen

Diantara komponen dari semen, yang mempunyai pengaruh penting pada *autogenous shrinkage* adalah hidrasi dari  $C_3A$  dan  $C_4AF$ . Semen yang mempunyai kadar komponen  $C_3A$  dan  $C_4AF$  yang tinggi akan meningkatkan *autogenous shrinkage*. Sedangkan penggunaan komponen  $C_3S$  dengan kadar tinggi pada semen menyebabkan *autogenous shrinkage* lebih rendah (Kristiawan, 2002).

Dengan bertambahnya pori-pori kapiler akan menyebabkan *self-desiccation* yang menyebabkan *autogenous shrinkage*, jadi penyebaran ukuran pori-pori dari pasta semen mempunyai pengaruh besar pada *autogenous shrinkage*. Penyebaran ukuran pori dikontrol oleh tingkatan kehalusan (*fineness*) dari semen. Dengan penggunaan semen yang sangat halus maka pori-pori terbuka diantara partikel semen sangat kecil. Dengan adanya pori-pori yang kecil akan menyebabkan tegangan pori yang lebih besar yang dapat menyebabkan terjadinya *autogenous shrinkage* diperlihatkan ketika semen yang sangat halus digunakan (Kristiawan, 2002).

##### b. Rasio air-semen (*water-cement ratio*)

Efek dari factor air semen pada *autogenous shrinkage* berlawanan dengan efek factor air semen pada *drying shrinkage*. Pada kasus *drying shrinkage* yang besar, sebaliknya pada kasus *autogenous shrinkage* penyusutan yang besar terjadi pada beton dengan factor air semen rendah. Rasio air-semen di dalam campuran menentukan ukuran pori yang lebih kecil. Ukuran yang lebih kecil ini akan menyebabkan tekanan kapiler yang lebih tinggi di dalam proses *self-desiccation* dari beton. Sebagai akibatnya, *autogenous shrinkage*



meningkat ketika rasio air-semen dikurangi. Pengaruh dari rasio air-semen pada *autogenous shrinkage* adalah tetap sepanjang waktu (Kristiawan, 2002).

#### **2.2.9.2 Mekanisme Terjadinya Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*)**

Pada waktu awal rongga-rongga yang ditempati oleh partikel semen dan air, secara bertahap ditempati oleh pengisi rongga hasil hidrasi. Pada tingkat awal pengerasan, kebanyakan dari pori kapiler dan partikel agregat adalah sangat jenuh dengan air. Ketika proses hidrasi berlanjut, air yang dibutuhkan untuk proses hidrasi ini tersedia cukup dengan adanya *external curing*, namun bila beton tertutup rapat dan tidak mendapatkan *external curing* maka semen mengkonsumsi air pori dalam proses hidrasi ini (*self-desiccation*). Sebagai akibat dari proses *self-desiccation* ini, kelembapan relatif dari beton turun dan di dalam pori-pori kapiler timbul tegangan. Tegangan pori ini yang menyebabkan terjadinya *autogenous shrinkage*.

#### **2.2.9.3 Efek *Autogenous Shrinkage* Jangka Panjang**

*Autogenous shrinkage* terjadi pada struktur beton karena beton kehilangan kelembapannya yang disebabkan oleh penguapan ataupun digunakan untuk hidrasi semen. Adanya *autogenous shrinkage* yang berlebihan pada struktur akan menyebabkan deformasi seiring bertambahnya umur beton, menyebabkan terjadinya tegangan-tegangan tekan dalam baja dan tarik pada beton. Hanya penulangan yang simetris yang dapat mempertahankan lengkungan dan lenturan.

#### **2.2.9.4 Prediksi *Autogenous Shrinkage* Jangka Panjang**

Terdapat beberapa metode prediksi susut jangka panjang yang dapat digunakan untuk memprediksi susut yang terjadi di masa depan. Dalam penelitian ini akan digunakan tiga metode prediksi dalam menghitung susut *autogenous*, ketiga metode tersebut adalah ACI 209R-92, CEB-FIP 1990, dan Ross's *Hyperbolic Equation*.

ACI 209R-92 mengusulkan untuk memprediksi susut jangka panjang dari data-data jangka pendek yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2.

$$\varepsilon_s = \frac{t}{35} \cdot \varepsilon_s \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dengan:

$\varepsilon_s$  = nilai susut kering umur t

$\varepsilon_s$  = besar *ultimate shrinkage*

t = umur pengujian ( hari )

CEB-FIP 1990 mengusulkan untuk memprediksi susut jangka panjang dari data-data jangka pendek yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.3.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_s \left[ 1 + \beta_s \left( \frac{t}{350} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Dengan:

$\varepsilon_s$  = nilai susut kering umur t

$\varepsilon_s$  = koefisien susut kering (*ultimate shrinkage*)

$\beta_s$  = koefisien pertambahan susut kering terhadap waktu

t = umur pengujian ( hari )

= umur susut kering mulai diukur

H =  $2.A_c/u$

$A_c$  = luas benda uji (mm)

u = keliling benda uji (mm)

Ross's *Hyperbolic Equation* menyatakan dalam rumus prediksinya pada persamaan 2.4.

$$\varepsilon_{sh(t)} = \frac{t}{57,4+t} 2,3575 S_{(28)} \quad \text{commit to user} \quad (2.4)$$

dengan:  $\epsilon_{sh(t)}$  = nilai susut *autogenous* umur  $t$  (selama pengujian)

$2,3575 S_{(28)}$  = besar *ultimate shrinkage*,

$S_{28}$  = shrinkage umur 28 hari

$t$  = umur pengujian (hari)

### 2.2.10 Evaluasi Metode Prediksi Susut Jangka Panjang

Metode evaluasi prediksi susut jangka panjang diperlukan untuk mengetahui tingkat akurasi dari metode prediksi susut jangka panjang tersebut. Dari hasil Metode evaluasi tersebut nantinya dapat digunakan sebagai acuan untuk menilai metode prediksi yang terbaik untuk digunakan seterusnya. Metode evaluasi yang digunakan antara lain adalah *Best-Fit Line*, *Residual Analysis*, dan *Coefficient of Variation of Error*. Metode evaluasi *Best-Fit Line* adalah metode sederhana yang membandingkan hasil pengukuran langsung dengan hasil prediksi susut menggunakan rumus prediksi yang kemudian diplotkan dalam grafik untuk mendapatkan fungsi regresi linier. Gradien dari grafik *best-fit line* menunjukkan deviasi dari hasil pengukuran langsung dengan hasil dari prediksi jangka panjang, indikasi sebuah metode prediksi mempunyai keakuratan tinggi adalah ditunjukkan dengan nilai gradien yang semakin dekat dengan nilai 1.

Metode evaluasi *Residual Analysis* adalah metode yang menggunakan selisih dari hasil pengurangan nilai prediksi dengan nilai pengukuran langsung, sehingga didapatkan nilai  $R$ . Nilai  $R$  dapat berupa nilai positif dan negatif. Nilai  $R$  positif menunjukkan bahwa prediksi *overestimate*, sedangkan nilai  $R$  negatif menunjukkan prediksi yang bagus. Metode prediksi yang akurat ditunjukkan dalam hasil yang didapatkan dari grafik hubungan nilai  $R$  dengan waktu pengujian. Metode prediksi yang bagus memiliki hasil berupa rerata nilai  $R$  yang rendah dan persentase nilai  $R$  di dalam jangkauan 40 *microstrain* yang tinggi.

Metode *Coefficient of Variation of Error* adalah metode yang menghitung *coefficient of variation of error* ( $M$ ) menggunakan persamaan tertentu. Metode Prediksi yang bagus ditunjukkan dengan hasil nilai  $M$  yang rendah.

Persamaan yang diberikan : 
$$\frac{1}{n} \sum_{pr} \varepsilon_s = \varepsilon_s /$$
  
 (4.4)

dengan:  $\bar{\varepsilon}_{sh} - p(t)$  = nilai rerata prediksi susut

$\varepsilon_{sh} - p(t)$  = nilai prediksi susut ,

$\varepsilon_{sh} - m(t)$  = nilai pengukuran susut

t = umur pengujian (hari)

n = jumlah data susut



## BAB 4

### ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

#### 4.1. Hasil Pengujian Bahan Dasar

Pengujian bahan dan benda uji dilaksanakan sesuai dengan tata cara dan standar pengujian yang terdapat pada ASTM. Waktu pelaksanaan percobaan disesuaikan dengan jadwal penelitian dan ijin penggunaan Laboratorium Bahan Fakultas Teknik UNS Surakarta.

Dalam bab ini akan disajikan hasil penelitian dan pembahasan terhadap hasil yang diperoleh. Sedangkan data rinci hasil pemeriksaan bahan dasar dan penyusun beton disajikan dalam lampiran A.

##### 4.1.1. Hasil Pengujian Agregat Halus

Pengujian terhadap agregat halus dalam penelitian ini meliputi pengujian kadar lumpur, kandungan zat organik, *specific gravity*, gradasi agregat dan berat jenis. Data-data pengujian dan hitungannya secara lengkap terdapat pada Lampiran A. Hasil-hasil pengujian tersebut disajikan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil Pengujian Agregat Halus

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
<i>Absorbtion</i>	3,093 %	-	-
<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,887 gr/cm <sup>3</sup>	-	-
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,650 gr/cm <sup>3</sup>	-	-
Kandungan Zat Organik	Kuning muda	Kuning	Memenuhi syarat
Kandungan Lumpur	4 %	Maks 5 %	Memenuhi syarat
<i>Bulk Specific SSD</i>	2,732 gr/cm <sup>3</sup>	2,5-2,7 gr/cm <sup>3</sup>	Memenuhi syarat
Modulus Halus	2,66	2,3 – 3,1	Memenuhi syarat

Hasil pengujian gradasi agregat halus dan syarat batas dari ASTM C-33 dapat dilihat pada Tabel 4.2.dan Gambar 4.1.

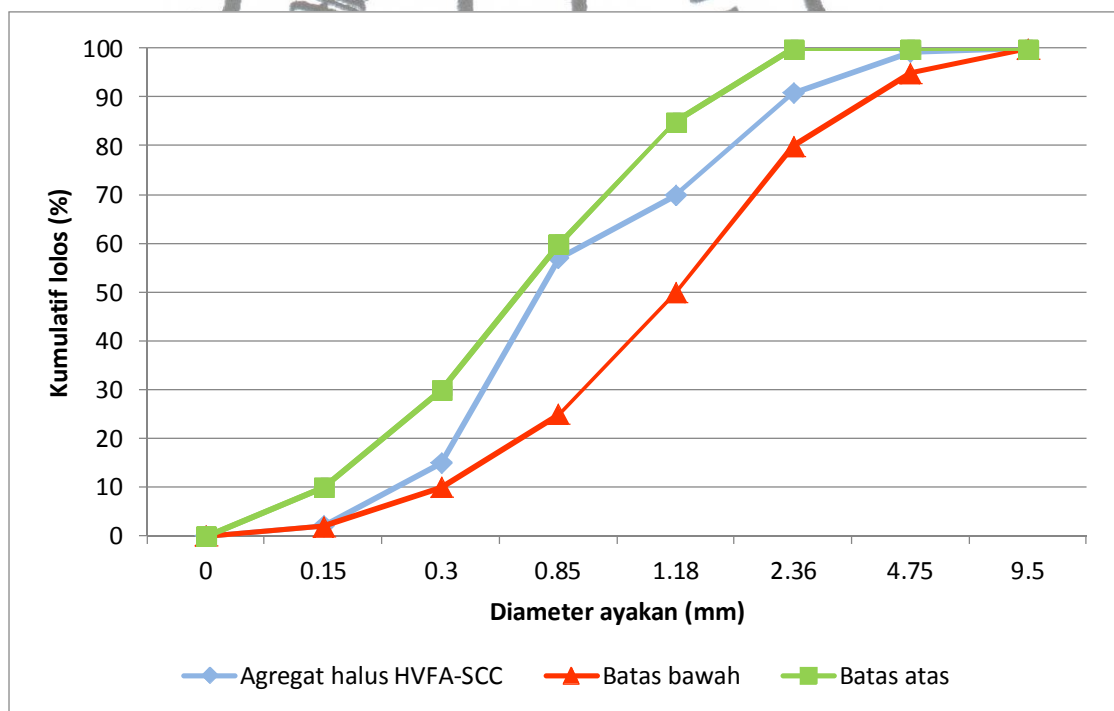
*commit to user*



Tabel 4.2. Hasil Pengujian Gradasi Agregat Halus

No	Diameter Ayakan (mm)	Berat Tertahan			Berat Lolos Kumulatif (%)	ASTM C-33
		Gram	%	Kumulatif (%)		
1	9,5	0	0,00	0,00	100,00	100
2	4,75	18	0,60	0,60	99,40	95 - 100
3	2,36	254	8,48	9,08	90,92	80 - 100
4	1,18	627	20,93	30,01	69,99	50 - 85
5	0,85	389	12,98	42,99	57,01	25 - 60
6	0,3	1257	41,96	84,95	15,05	10 - 30
7	0,15	387	12,92	97,86	2,14	2 - 10
8	0	64	2,14	100,00	0,00	0
Jumlah		<b>2996</b>	<b>100</b>	<b>365,49</b>		-

Dari Tabel 4.2. didapat grafik gradasi beserta batas gradasi yang disyaratkan ASTM C-33 yang ditunjukkan dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Gradasi Agregat Halus

#### 4.1.2. Hasil Pengujian Agregat Kasar

Pengujian terhadap agregat kasar *split* (batu pecah) yang dilaksanakan dalam penelitian ini meliputi pengujian berat jenis (*specific gravity*), keausan (*abrasi*) dan gradasi agregat kasar. Hasil-hasil pengujian tersebut disajikan dalam Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 menyajikan hasil analisis ayakan terhadap sampel agregat kasar sehingga dapat diketahui gradasinya. Data hasil pengujian secara lengkap disajikan dalam lampiran A.

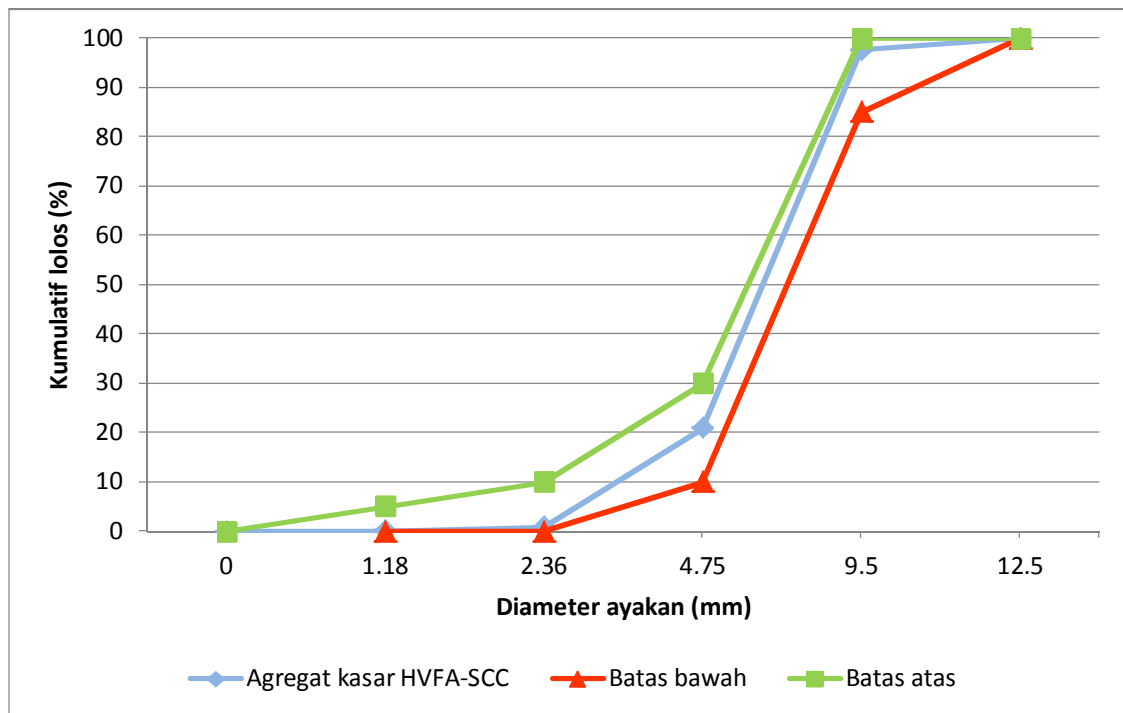
Tabel 4.3. Hasil Pengujian Agregat Kasar

Jenis Pengujian	Hasil Pengujian	Standar	Kesimpulan
Abrasi	43,50 %	Maksimum 50 %	Memenuhi syarat
<i>Absorbtion</i>	6,167 %	-	-
<i>Bulk Specific Gravity</i>	2,381 gr/cm <sup>3</sup>	-	-
<i>Bulk Specific SSD</i>	2,528 gr/cm <sup>3</sup>	2,5-2,7	Memenuhi syarat
<i>Apparent Specific Gravity</i>	2,791gr/cm <sup>3</sup>	-	-
Modulus Halus Butir	2,81	-	-

Tabel 4.4. Hasil Pengujian Gradasi Agregat Kasar

No	Diameter Ayakan (mm)	Berat Tertahan			Berat Lolos Kumulatif (%)	ASTM C-33
		Gram	%	Kumulatif (%)		
1	12,50	0	0,00	0,00	100,00	100
2	9,50	72	2,40	2,40	97,60	85 – 100
3	4,75	2300	76,77	79,17	20,83	10 – 30
4	2,36	598	19,96	99,13	0,87	0 – 10
5	1,18	21	0,70	99,83	0,17	0 – 5
6	0	5	0,17	100,00	0,00	-
<b>Jumlah</b>		<b>2996</b>	<b>100</b>	<b>380,54</b>	-	-

Dari Tabel 4.4 didapat grafik gradasi beserta batas gradasi yang disyaratkan ASTM C-33 yang ditunjukkan dalam Gambar 4.2.sebagai berikut:



Gambar 4.2. Gradasi Agregat Kasar

#### 4.1.3 Hasil Pengujian *Fly Ash*

Dari hasil uji laboratorium yang telah dilakukan Balai Besar Teknik Kesehatan Lingkungan dan Pemberantasan Penyakit Menular (BBTKLPPM) Yogyakarta, *fly ash* yang dipakai untuk penelitian ini adalah *fly ash* yang diperoleh dari PLTU Cilacap masuk dalam golongan *fly ash* tipe C. Hasil pengujian *fly ash* berdasarkan parameter yang diteliti dapat dilihat di Tabel. 4.5.

Tabel. 4.5. Hasil Pengujian *Fly Ash* dari PLTU Cilacap.

No	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Klasifikasi		
				F	N	C
	Berat Jenis	gr/cm <sup>3</sup>	1,334			
	Kerapatan	%	2,222			
	Kadar Air	%	0,16			
	Hilang Pijar	%	0,53			
	Kelembaban	%	31,0			
	Lolos 200 mesh	%	79,38			
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,687	70	70	50
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	3,389			
	SiO <sub>2</sub>	%	54,44			
	CaO	%	0,0185			
	Na <sub>2</sub> O	%	0,0237			
	SO <sub>3</sub>	%	0,036			

Sumber : Laboratorium Fisika Kimia Padatan dan B3 Balai Besar Teknik Kesehatan Lingkungan dan Pemberantasan Penyakit Menular (BBTKL PPM) Yogyakarta.

## 4.2. Rancang Campur

Dari hitungan rancang campur (*mix design*) adukan beton diperoleh kebutuhan bahan untuk 1 m<sup>3</sup> *High Volume Fly Ash - Self Compacting Concrete* (HVFA-SCC) seperti pada Tabel 4.6.sampai dengan Tabel. 4.8.

Tabel 4.6. Proporsi Campuran Adukan HVFA-SCC Untuk Setiap Variasi Per 1 m<sup>3</sup>.

Variasi Fly Ash	Semen (Kg)	Fly Ash (Kg)	Pasir (Kg)	Kerikil (Kg)	Air (Kg)	Superplasticizer (Kg)
35%	440,3286	237,1000	671,177	669,589	150,9264	7,7227
55%	304,8429	372,5857	671,177	669,589	149.3611	7,7227
65%	237,1000	440,3286	671,177	669,589	124.0972	7,7227

Tabel 4.7. Proporsi Campuran Adukan HVFA-SCC Untuk Tiap 1 Kali Adukan (6 Benda Uji)

Kadar fly ash (%)	Semen OPC (kg)	Fly ash (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)	Superplasticizer (kg)
35%	3.85172159	2.074	5.87103	5.85714	1.32021	0.067555954
55%	2.66657514	3.25915	5.87051	5.85714	1.30652	0.067555954
65%	2.07400191	3.85172	5.87051	5.85714	1.08552	0.067555954

Tabel 4.8. Proporsi Campuran Adukan HVFA-SCC untuk Kebutuhan 1 Benda Uji

Kadar fly ash (%)	Semen OPC (kg)	Fly ash (kg)	Pasir (kg)	Kerikil (kg)	Air (kg)	Superplasticizer (kg)
35%	0.6419536	0.34567	0.97851	0.97619	0.22003	0.011259326
55%	0.44442919	0.54319	0.97842	0.97619	0.21775	0.011259326
65%	0.34566699	0.64195	0.97842	0.97619	0.18092	0.011259326

Hitungan proporsi campuran adukan beton untuk setiap variasi secara lengkap terdapat pada Lampiran B.

## 4.3. Hasil Pengujian Beton Segar

Untuk mendapatkan *High Volume Fly Ash Concrete* yang memiliki sifat beton segar *Self Compacting Concrete* perlu adanya pengujian, antara lain *Flow Table Tes*, *J-Ring Flow Table Test*, *Box Type Test*, *L-Box Test*, *V-Funnel Test*. Dari hasil pengujian didapat nilai *slump flow* dari masing-masing beton dapat dilihat pada Tabel 4.9. sampai dengan Tabel 4.13.

Tabel 4.9. Hasil Pengujian *Flow Table Test* HVFA-SCC

Kadar Fly ash	Sampel Pencampuran	<i>Flow Table</i>					
		Diameter maximal			Waktu		Kecepatan
		d1	d2	d <sub>rata-rata</sub>	t <sub>500</sub>	t <sub>max</sub>	
		(mm)	(mm)	(mm)	(dt)	(dt)	(mm/dt)
35%	19 Maret 2012	710	780	745	3.7	22.9	32.533
55%	28 Maret 2012	720	760	740	3.57	19.7	37.563
65%	2 April 2012	770	760	765	3.27	14.1	54.255

Tabel 4.10. Hasil Pengujian *J-Ring Flow Table Test* HVFA-SCC

Kadar Fly ash	Sampel Pencampuran	<i>J-Ring Flow Table</i>					
		Diameter maximal			Waktu		Kecepatan
		d1	d2	d <sub>rata-rata</sub>	t <sub>500</sub>	t <sub>max</sub>	
		(mm)	(mm)	(mm)	(dt)	(dt)	(mm/dt)
35%	26 Maret 2012	600	610	605	9.58	33.69	17.958
55%	20 Maret 2012	650	710	680	8.36	19.22	35.380
65%	3 April 2012	650	680	665	7.15	17.32	38.395

Tabel 4.11. Hasil Pengujian *L-Box Test* HVFA-SCC

Kadar Fly ash	Sampel Pencampuran	<i>L-Box test</i>				
		t <sub>200</sub>	t <sub>400</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub>
		(dt)	(dt)	(mm)	(mm)	
35%	27 Maret 2012	3.34	6.5	110	80	0.727
55%	29 Maret 2012	4.2	6.7	100	90	0.900
65%	22 Maret 2012	5.4	7.2	100	85	0.850

Tabel 4.12. Hasil Pengujian *Box – Type Test* HVFA-SCC

Kadar Fly ash	Sampel Pencampuran	<i>Box Type</i>		
		h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub>
		(mm)	(mm)	
35%	27 Maret 2012	350	350	1
55%	28 Maret 2012	350	350	1
65%	2 April 2012	350	350	1



Tabel 4.13. Hasil Pengujian *V-Funnel Test* HVFA-SCC

Kadar Fly ash	Sampel Pencampuran	<i>V-Funnel Test</i>
		t
		(dt)
35%	26 Maret 2012	24.73
55%	29 Maret 2012	22.98
65%	3 April 2012	16

Berdasarkan Tabel 4.9. sampai Tabel 4.13 dapat menyimpulkan nilai *slump flow* pada HVFA-SCC, semakin banyak kandungan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen semakin cepat kemampuan mengalirnya . Hal ini dikarenakan butiran *fly ash* yang berbentuk bulat dapat menambah kelecakan beton segar pada HVFA-SCC sehingga memiliki sifat *workability* yang baik. *Workability* merupakan faktor yang penting dalam pembuatan adukan beton diperlukan untuk memudahkan proses pengadukan, pengangkutan dan penuangan.

Selain itu beton HVFA SCC juga memiliki kemampuan *pasinggability* yang baik. Kemampuan *pasinggability* pada beton berkaitan erat dengan kemampuan beton segar untuk dapat mengisi ruang kosong pada bagian beton yang memiliki tulangan yang padat seperti pada *joint* balok dan kolom sehingga tidak perlu lagi melakukan pemadatan.

#### 4.4. Pengujian *Shrinkage* Pada HVFA-SCC

##### 4.4.1 *Total Shrinkage*

Susut beton diukur pada saat beton berumur 1 hingga 90 hari dengan menggunakan alat *Demountable Mechanical Strain Gauge (dial gauge)* yang memakai standar ASTM C157. Susut beton didapat dari hitungan antara selisih perubahan panjang dibagi panjang mula-mula. Berikut contoh hitungan total *shrinkage* hari ke-4 untuk benda uji susut HVFA-SCC kadar 35% :

Tabel 4.14 Data Pengukuran Susut Pada Benda Uji K35%-1 HVFA-SCC Kadar 35%.

K35%-1		hari-1				hari-4			
Pembacaan	ref bar	point 1	point 2	point 3	point 4	point 1	point 2	point 3	point 4
1	400	1756	2024	1643	2165	1778	2100	1690	2219
2	400	1719	2044	1659	2153	1776	2070	1689	2220
3	400	1745	2054	1665	2180	1780	2089	1676	2227
4	400	1783	2044	1650	2157	1789	2075	1665	2210
5	400	1749	2040	1634	2182	1790	2069	1699	2201
Jumlah	2000	8752	10206	8251	10837	8913	10403	8419	11077
Rata-rata	400	1750.4	2041.2	1650.2	2167.4	1782.6	2080.6	1683.8	2215.4
Perubahan panjang		0	0	0	0	32.2	39.4	33.6	48
Shrinkage * 10 <sup>-6</sup>		0	0	0	0	161	197	168	240
Rerata		0				191.5			

$$\text{Hitungan Rata-rata Point 1} = \frac{1778+1776+1780+1789+1790}{5} = 1782,6 \mu\text{m}$$

$$\Delta L = L_4 - L_0 = 1782,6 - 1750,4 = 32,2 \mu\text{m} = 32,2 \times 10^{-6} \text{ m} = 32,2 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$\varepsilon_{sh(1)} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{32,2 \times 10^{-3} \text{ mm}}{200 \text{ mm}} = 1,61 \times 10^{-4} \text{ strain}$$

$$= 161 \times 10^{-6} \text{ strain}$$

$$= 161 \text{ microstrain}$$

Dari *point* 1, 2, 3, dan 4 maka didapat susut rata-rata sampel K35%-1 :

*commit to user*

$$\varepsilon_{sh(rata-rata)} = \left( \frac{\varepsilon_{sh(1)} + \varepsilon_{sh(2)} + \varepsilon_{sh(3)} + \varepsilon_{sh(4)}}{4} \right) = \left( \frac{161+197+168+240}{4} \right) = 191,5 \text{ microstrain}$$

Dari sampel K35%-1, K35%-2, dan K35%-3 maka didapat susut rata-rata:

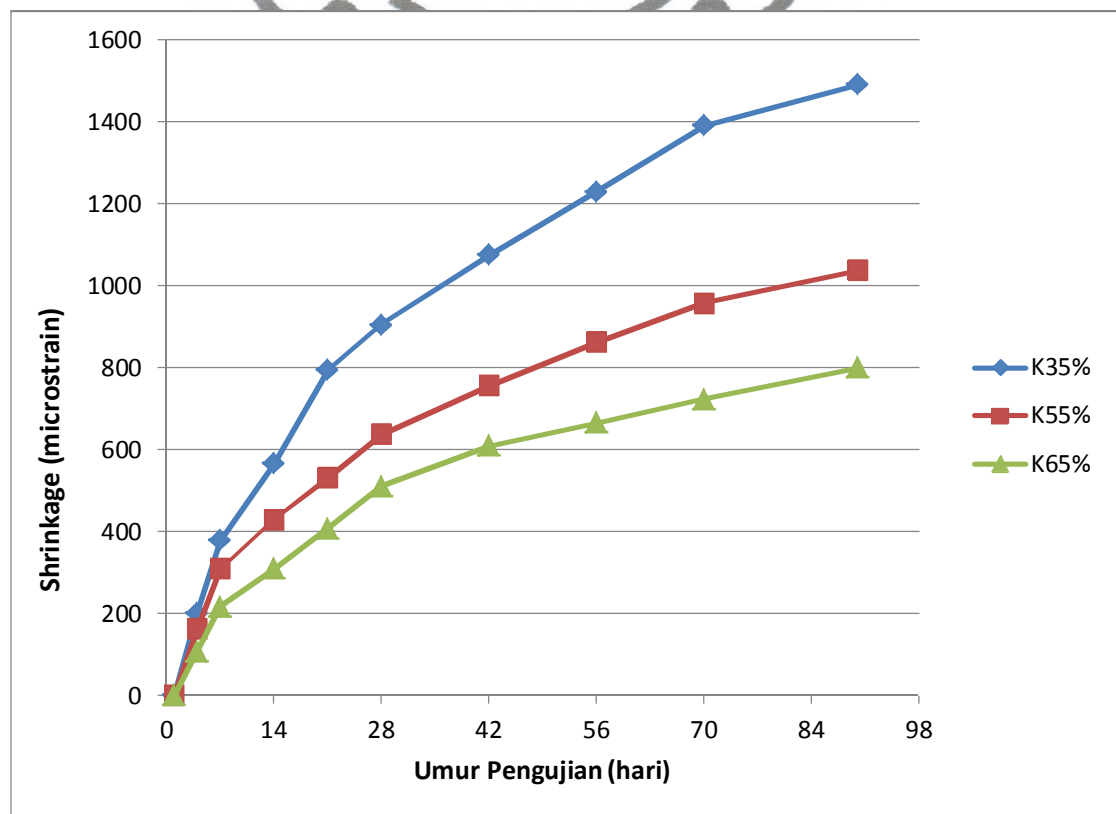
$$\varepsilon_{sh(rata-rata)} = \left( \frac{\varepsilon_{sh(K35\%-1)} + \varepsilon_{sh(K35\%-2)} + \varepsilon_{sh(K35\%-3)}}{3} \right) = \left( \frac{191,5 + 218,75 + 196,75}{3} \right) = 202,33 \text{ microstrain}$$

Hasil hitungan rerata *total shrinkage* kadar 35%, 55%, dan 65% ditampilkan pada Tabel 4.15, sedangkan selengkapnya terdapat pada Lampiran D.

Tabel 4.15. Hasil Hitungan Rerata *Total Shrinkage* HVFA-SCC (dalam *microstrain*)

RTS	Hari Ke-									
Benda Uji	1	4	7	14	21	28	42	56	70	90
K35%	0	202.3333	378.9167	566.0833	794.25	905.5	1076.417	1230.167	1391.917	1491.167
K55%	0	162.9167	310.5	430.25	532.5833	638.9167	756.75	863.75	958.25	1038.75
K65%	0	107.5	218.3333	309.1667	409.0833	511.8333	609.5833	666.4167	724.4167	801.4167

Grafik perbandingan *total shrinkage* HVFA-SCC kadar 35%, 55%, dan 65% ditampilkan dalam Gambar 4.3. sebagai berikut:



Gambar 4.3. Perbandingan *Total Shrinkage* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%

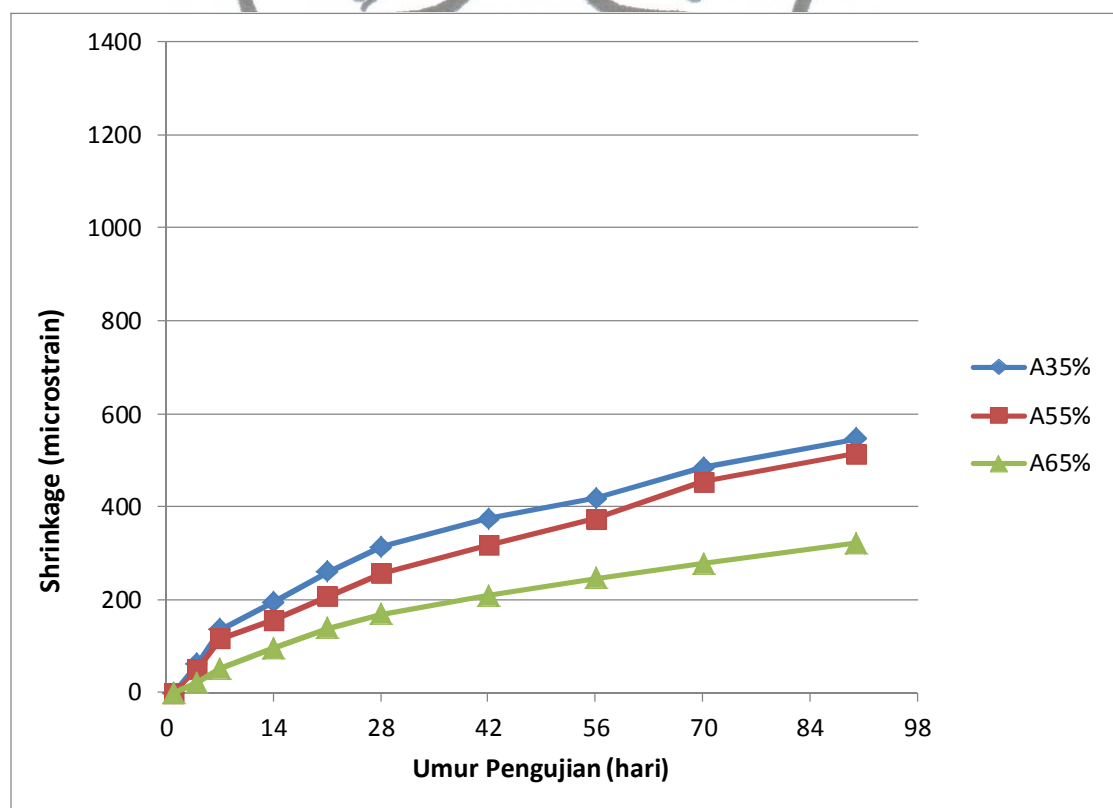
#### 4.4.2 Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*)

Susut *autogenous* HFVA-SCC diukur pada saat beton berumur 1 hingga 90 hari dengan menggunakan alat *Demountable Mechanical Strain Gauge (dial gauge)* yang memakai standar ASTM C157. Pada benda uji susut *autogenous* digunakan pembungkus berupa *fastband* yang bertujuan untuk menghindarkan benda uji dari paparan udara bebas. Data hasil pengukuran susut *autogenous* ditampilkan dalam Tabel 4.16. Data pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran D.

Tabel 4.16. Hasil Hitungan Rerata *Autogenous Shrinkage* HVFA-SCC (dalam *microstrain*)

RAS	Hari Ke-									
Benda Uji	1	4	7	14	21	28	42	56	70	90
A35%	0	62.5	136.1667	196.25	261	315.0833	375.3333	419.75	485.25	547.6667
A55%	0	51.66667	118.0833	158.0833	208.8333	257.5	318.3333	375.0833	454.4167	515.25
A65%	0	22.08333	52.33333	96.33333	139.4167	170.4167	209.75	246.75	279	323.0833

Grafik perbandingan *autogenous shrinkage* HVFA-SCC kadar 35%, 55%, dan 65% ditampilkan dalam Gambar 4.4. sebagai berikut:



Gambar 4.4. Perbandingan *Autogenous Shrinkage* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%

#### 4.4.2.1 Analisis *Autogenous Shrinkage* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%

Data *autogenous shrinkage* berbagai kadar diperoleh melalui pengukuran secara langsung terhadap benda uji. Hasil pengukuran kemudian diolah dan disajikan dalam Tabel 4.16 yang kemudian dari hasil pengolahan data tersebut dibuat grafik perbandingan *autogenous shrinkage* HVFA-SCC kadar 35%, 55%, dan 65%.

Gambar 4.4 menunjukkan bahwa penggunaan *fly ash* kadar 35%, 55%, dan 65% sebagai bahan pengganti sebagian semen dapat mengurangi terjadinya susut *autogenous* pada HVFA-SCC. Dari gambar 4.4 terlihat bahwa kadar yang memiliki nilai susut *autogenous* terendah berturut-turut adalah kadar 65%, 55%, dan 35%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai susut *autogenous* semakin kecil seiring bertambahnya penggunaan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton.

Akibat penambahan kadar *fly ash* yang semakin besar, maka akan mengurangi penggunaan semen dalam campuran. Penggunaan semen yang semakin kecil dapat mempengaruhi terjadinya susut *autogenous*. Berkurangnya nilai susut *autogenous* seiring berkurangnya penggunaan semen dalam campuran dapat terjadi karena disebabkan oleh berkurangnya hidrasi semen. Hidrasi semen memang berperan besar dalam susut *autogenous*, sehingga jika penggunaan semen semakin sedikit dalam campuran maka nilai susut *autogenous* yang terjadi pun semakin berkurang.

#### 4.4.3 Susut Kering (*Drying Shrinkage*)

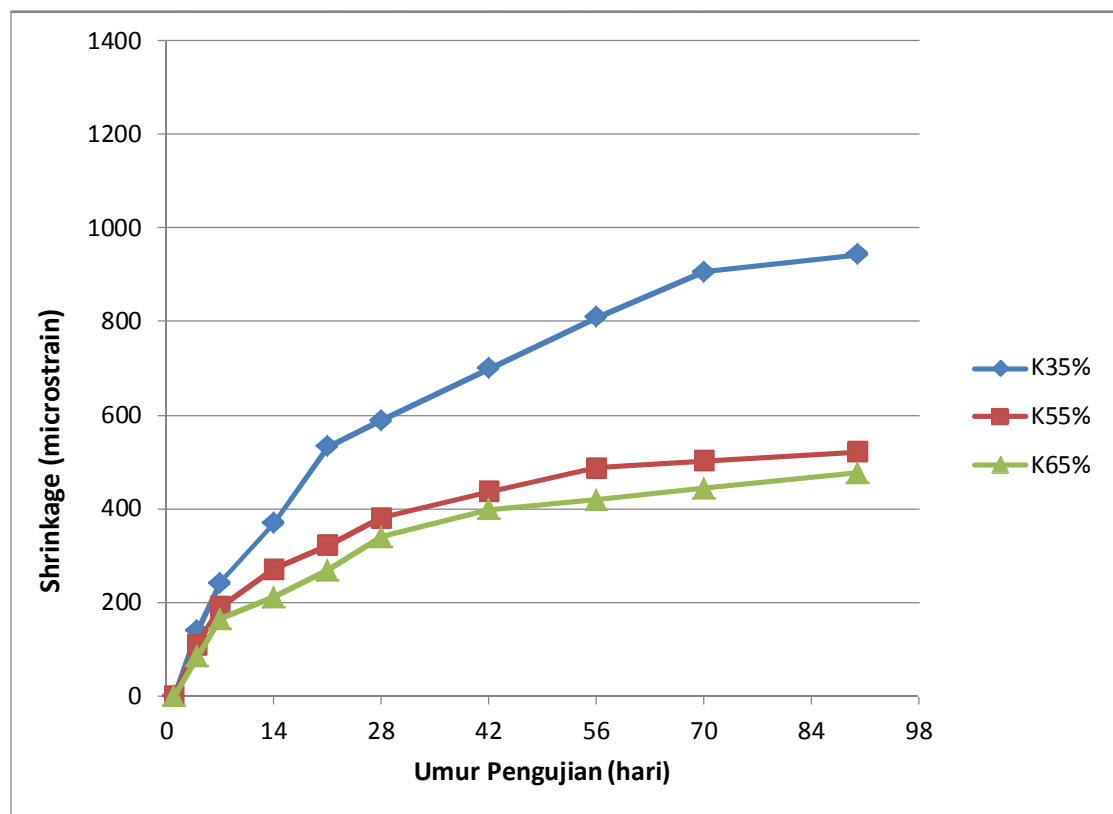
Susut kering HFVA-SCC diukur pada saat beton berumur 1 hingga 90 hari dengan menggunakan alat Demountable Mechanical Strain Gauge (*demec gauge*) yang memakai standar ASTM C157. Pada benda uji susut kering tidak digunakan pembungkus berupa fastband bertujuan agar benda uji mendapatkan paparan dari udara bebas. Susut kering merupakan hasil dari rerata *total shrinkage* dikurangi rerata *autogenous shrinkage*. Data hasil pengukuran susut kering ditampilkan dalam Tabel 4.17. Data pengujian selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran D.



Tabel 4.17. Hasil Hitungan Rerata *Drying Shrinkage* HVFA-SCC (dalam microstrain)

RDS	Hari Ke-									
Benda Uji	1	4	7	14	21	28	42	56	70	90
K35%	0	139.8333	242.75	369.8333	533.25	590.4167	701.0833	810.4167	906.6667	943.5
K55%	0	111.25	192.4167	272.1667	323.75	381.4167	438.4167	488.6667	503.8333	523.5
K65%	0	85.41667	166	212.8333	269.6667	341.4167	399.8333	419.6667	445.4167	478.3333

Grafik perbandingan *drying shrinkage* HVFA-SCC kadar 35%, 55%, dan 65% ditampilkan dalam Gambar 4.5. sebagai berikut:



Gambar 4.5. Perbandingan *Drying Shrinkage* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%

#### 4.4.3.1 Analisis *Drying Shrinkage* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%

Data rerata *drying shrinkage* berbagai kadar diperoleh dari rerata *total shrinkage* dikurangi rerata *autogenous shrinkage*. Hasil pengurangan rerata tersebut kemudian diolah dan disajikan dalam Tabel 4.17 yang kemudian dari hasil pengolahan data tersebut dibuat grafik perbandingan *drying shrinkage* HVFA-SCC kadar 35%, 55%, dan 65%.

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa penggunaan fly ash kadar 35%, 55%, dan 65% sebagai bahan pengganti sebagian semen dapat mengurangi terjadinya susut kering (*drying shrinkage*) pada HVFA-SCC. Dari gambar 4.5 terlihat bahwa kadar yang memiliki nilai susut kering (*drying shrinkage*) terendah berturut-turut adalah kadar 65%, 55%, dan 35%. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa nilai susut kering (*drying shrinkage*) semakin kecil seiring bertambahnya penggunaan *fly ash* sebagai pengganti sebagian semen dalam campuran beton.

Berkurangnya nilai susut kering (*drying shrinkage*) seiring bertambahnya penggunaan *fly ash* dalam campuran terjadi karena *fly ash* memiliki butiran yang sangat halus dan lebih kecil dari butiran semen. Butiran *fly ash* yang halus dan lebih kecil dari butiran semen tersebut memungkinkan *fly ash* dapat mengisi ruang kosong antar butiran semen, sehingga beton lebih padat dan kedap terhadap air. Dengan beton lebih padat dan kedap terhadap air, maka kehilangan kandungan air dalam beton akan semakin berkurang dan hal ini juga mempengaruhi besarnya susut kering yang terjadi.

#### 4.5. Hasil Hitungan Prediksi Susut

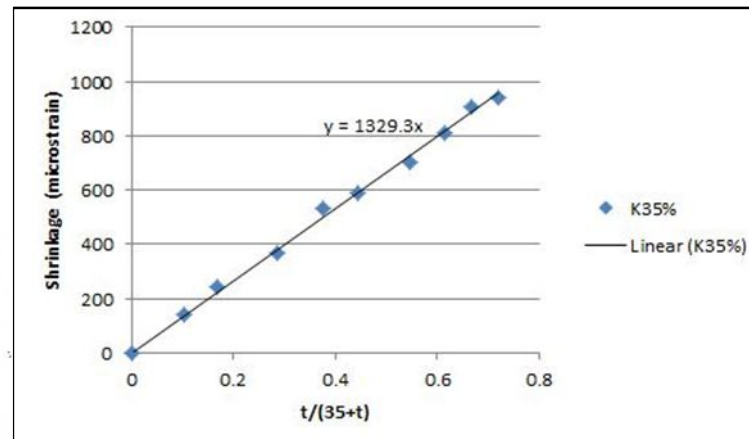
Hitungan prediksi susut perlu dilakukan karena susut akan terus berlangsung sampai jangka waktu yang lama. Cara memprediksi susut pada penelitian ini menggunakan beberapa metode persamaan yaitu ACI 209R-92, CEB-FIP 1990, dan metode Ross's *Hyperbolic Equation*. Prediksi susut kering (*drying shrinkage*) menggunakan metode persamaan ACI 209R-92 dan CEB-FIP 1990, sedangkan untuk susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) menggunakan ACI 209R-92, CEB-FIP 1990, dan metode Ross's *Hyperbolic Equation*.

##### 4.5.1. Hasil Hitungan Prediksi Susut Kering (*Drying Shrinkage*) HVFA-SCC

###### Menggunakan ACI 209R-92

Berdasarkan pengujian susut kering (*drying shrinkage*) 90 hari, dapat diperkirakan susut kering (*drying shrinkage*) pada masa mendatang. Hasil hitungan rerata susut kering (*drying shrinkage*) pada Tabel 4.17. dapat digunakan untuk memperoleh hitungan prediksi susut kering (*drying shrinkage*) yang terjadi. Nilai *ultimate shrinkage* diperoleh dari hubungan antara susut kering (*drying shrinkage*) yang terjadi selama pengujian dengan waktu ( $t/(35+t)$ ). Contoh grafik hubungan susut kering

(*drying shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% yang terjadi selama pengujian dengan waktu ( $t/(35+t)$ ) dapat dilihat pada Gambar 4.6. Sedangkan lebih lengkapnya pada Lampiran E.



Gambar 4.6. *Ultimate Shrinkage* Susut Kering (*Drying Shrinkage*) HVFA-SCC Kadar 35%

Dari Gambar 4.6. diketahui persamaan regresi linier ( $Y=mx+c$ ) pada benda uji susut kering (*drying shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% adalah  $Y=1329.3x$ , dimana gradien ( $m$ ) adalah nilai *ultimate shrinkage* yaitu sebesar 1329 microstrain. Dari nilai *ultimate shrinkage* tersebut, dapat dihitung prediksi *shrinkage* sampai umur 1000 hari dengan menggunakan metode ACI 209R-92.

Berikut ini contoh hitungan untuk mendapatkan nilai prediksi susut kering dengan menggunakan ACI 209R-92 sebagai berikut :

$$\text{Persamaan yang diberikan : } \mathcal{E}_{sh(t)} = \frac{t}{35+t} \mathcal{E}_{sh(u)} \quad (4.1)$$

dengan:  $\mathcal{E}_{sh(t)}$  = nilai susut kering umur  $t$  (selama pengujian)

$\mathcal{E}_{sh(u)}$  = besar *ultimate shrinkage*

$t$  = umur pengujian (hari)

Diketahui:  $\mathcal{E}_{sh(u)} = 1329 \mu\text{s}$

$t = 1000$  hari

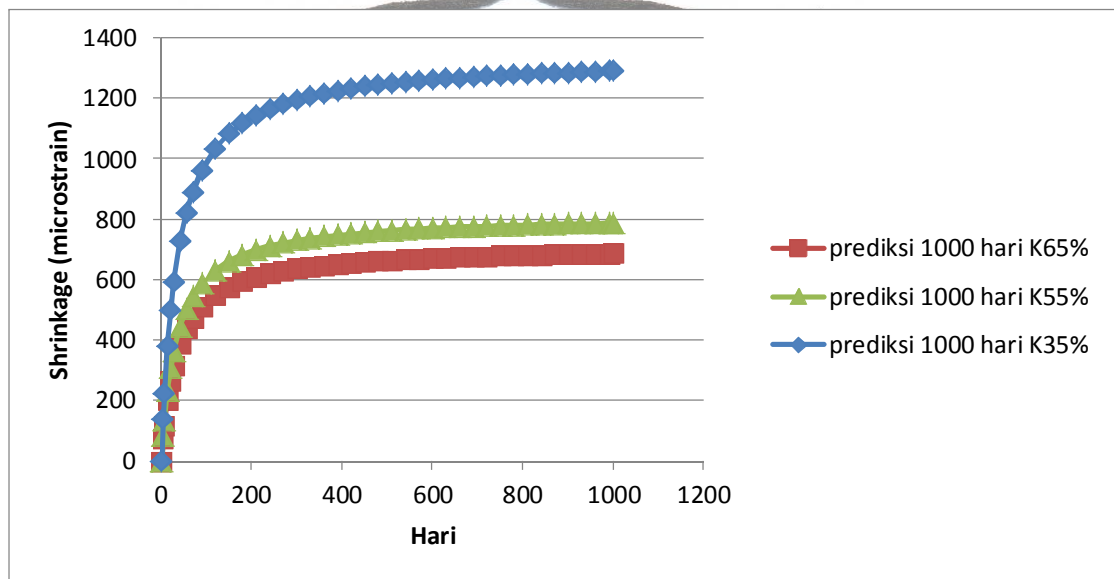
Maka, nilai prediksi *drying shrinkage* pada umur 1000 hari ( $\mathcal{E}_{sh(1000)}$ ) adalah:

$$\mathcal{E}_{sh(t)} = \frac{t}{35+t} \mathcal{E}_{sh(u)}$$

$$\mathcal{E}_{sh(1000)} = \frac{1000}{35+1000} 1329 \mu s$$

$$\mathcal{E}_{sh(1000)} = 1284,1 \mu s$$

Gambar 4.7 berikut memperlihatkan hasil prediksi metode ACI 209R-92. Gambar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.



Gambar 4.7. Prediksi Susut Kering Jangka Panjang Dengan Metode ACI 209R-92 Pada Benda Uji Susut Kering HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%.

Nilai prediksi susut kering (*drying shrinkage*) pada umur 1000 hari dapat dilihat pada Gambar 4.8. berikut:

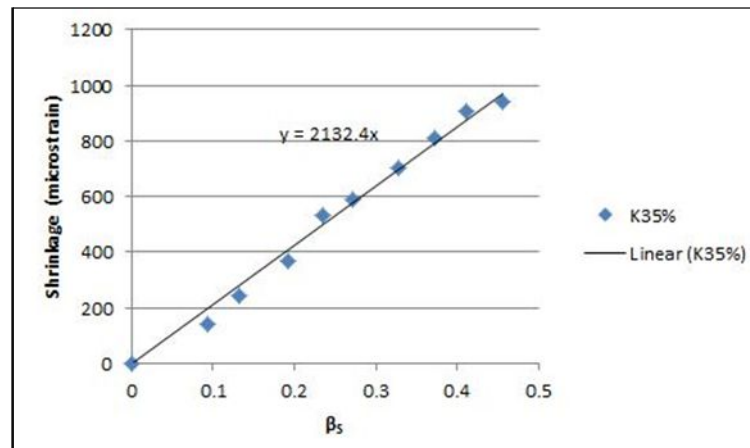


Gambar 4.8. Nilai Prediksi Susut Kering (*Drying Shrinkage*) Pada Umur 1000 Hari Dengan Metode ACI 209R-92

#### 4.5.2. Hasil Hitungan Prediksi Susut Kering (*Drying Shrinkage*) HVFA-SCC Menggunakan CEB-FIP 1990

Berdasarkan pengujian susut kering (*drying shrinkage*) 90 hari, dapat diperkirakan susut kering (*drying shrinkage*) pada masa mendatang. Hasil hitungan rerata susut kering (*drying shrinkage*) pada Tabel 4.17. dapat digunakan untuk memperoleh hitungan prediksi susut kering (*drying shrinkage*) yang terjadi berdasarkan metode prediksi dari CEB-FIP 1990. Nilai *ultimate shrinkage* ( $\epsilon_{cs0}$ ) diperoleh dari hubungan antara susut kering (*drying shrinkage*) yang terjadi selama pengujian dengan koefisien pertambahan susut kering terhadap waktu ( $\beta_s$ ). Contoh grafik hubungan susut kering (*drying shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% yang terjadi selama pengujian dengan koefisien pertambahan susut kering terhadap waktu ( $\beta_s$ ) dapat dilihat pada Gambar 4.9. Sedangkan lebih lengkapnya pada Lampiran E.





Gambar 4.9. *Ultimate Shrinkage* Susut Kering (*Drying Shrinkage*) HVFA-SCC Kadar

35%

Dari Gambar 4.9 diketahui persamaan regresi linier ( $Y=mx+c$ ) pada benda uji susut kering (*drying shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% adalah  $Y=2132.4$ , dimana gradien ( $m$ ) adalah nilai *ultimate shrinkage* yaitu sebesar 2132 microstrain. Dari nilai *ultimate shrinkage* tersebut, dapat dihitung prediksi *shrinkage* sampai umur 1000 hari dengan menggunakan metode CEB-FIP 1990.

Berikut ini contoh hitungan untuk mendapatkan nilai prediksi susut kering dengan menggunakan CEB-FIP 1990 sebagai berikut :

Persamaan yang diberikan :  $\epsilon_{cs} = \epsilon_{cs0} s$  (4.2)

$$s = \frac{t}{350}$$

dengan:  $\epsilon_{cs}$  = nilai susut kering umur  $t$  (selama pengujian)

$\epsilon_{cs0}$  = koefisien susut kering (*ultimate shrinkage*)

$\beta_s$  = koefisien pertambahan susut kering terhadap waktu

$t$  = umur pengujian (hari)

= umur susut kering mulai diukur

$H$  =  $2.A_c/u$

$A_c$  = luas benda uji (mm)

$u$  = keliling benda uji (mm)

*commit to user*

Diketahui:  $\epsilon_{cs0} = 2132 \mu s$

$$t = 1000 \text{ hari}$$

Maka, nilai prediksi *drying shrinkage* pada umur 1000 hari ( $\epsilon_{cs(1000)}$ ) adalah:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_{cs0} s$$

$$\epsilon_{cs(1000)} = 2132 s$$

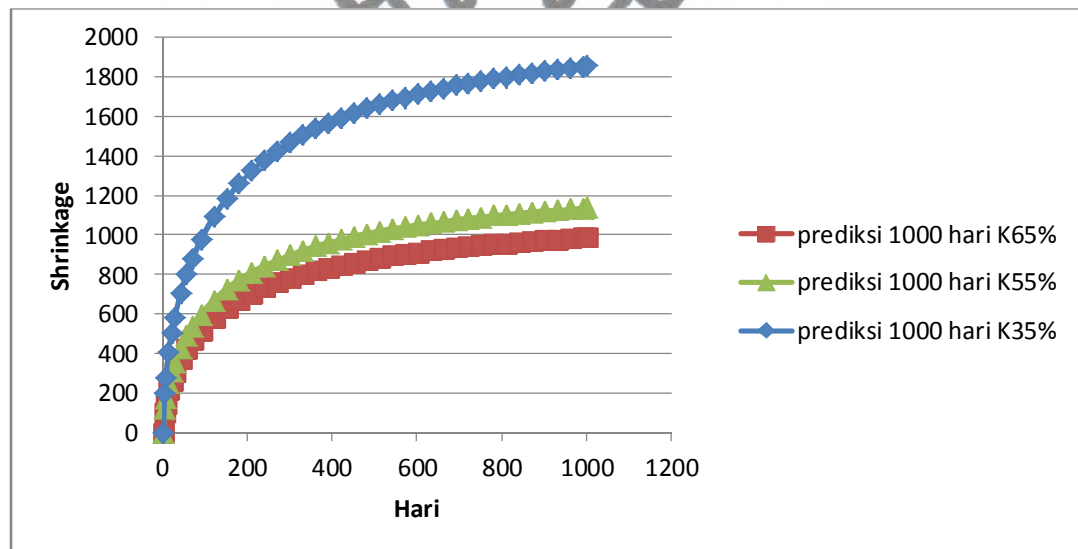
$$s(1000) = \frac{\frac{1000}{1000}}{350} = \frac{1}{350}$$

$$\begin{aligned} h &= 2Ac/u \\ &= 2(2 \times 3,14 \times 3,75(3,75+27,5)) / (4 \times 3,14 \times 3,75 + 2((2 \times 3,14 \times 3,75) + 27,5)) \\ &= 9,867 \text{ cm} \\ &= 98,67 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$s(1000) = \frac{\frac{1000}{1000}}{350} = \frac{1}{350} = 0,002857$$

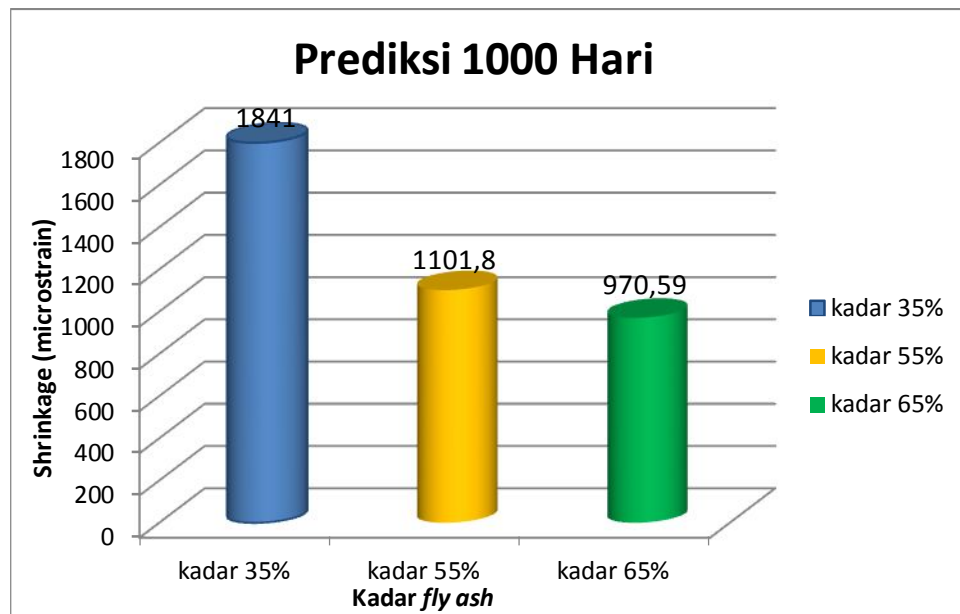
$$\begin{aligned} \text{maka, } \epsilon_{cs(1000)} &= 2132 s \\ &= 2132 \cdot 0,002857 \\ &= 609,1 \mu\text{s} \end{aligned}$$

Gambar 4.10 berikut memperlihatkan hasil prediksi metode CEB-FIP 1990. Gambar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.



Gambar 4.10. Prediksi Susut Kering Jangka Panjang Dengan Metode CEB-FIP 1990 Pada Benda Uji Susut Kering HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%.

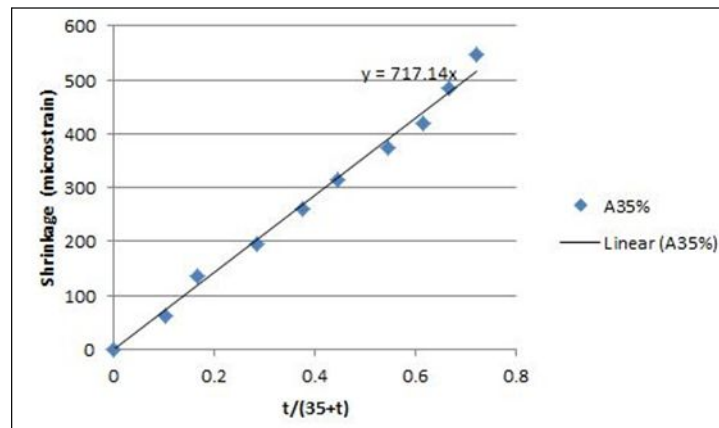
Nilai prediksi susut kering (*drying shrinkage*) pada umur 1000 hari dapat dilihat pada Gambar 4.11. berikut:



Gambar 4.11. Nilai Prediksi Susut Kering (*drying shrinkage*) Pada Umur 1000 Hari Dengan Metode CEB-FIP 1990

#### 4.5.3. Hasil Hitungan Prediksi Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*) HVFA-SCC Menggunakan ACI 209R-92

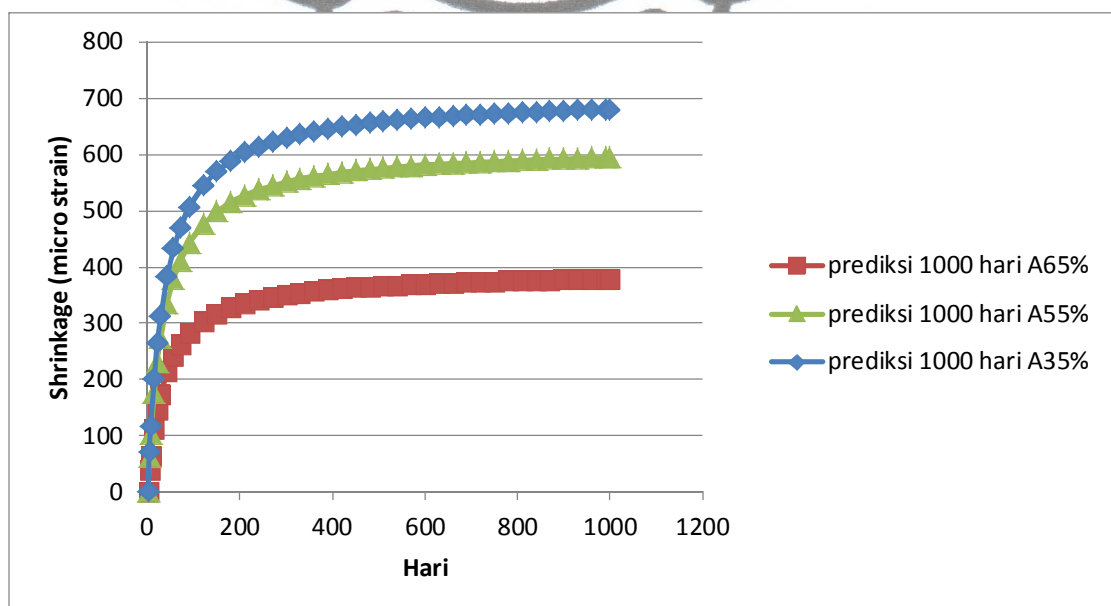
Berdasarkan pengujian susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) 90 hari, dapat diperkirakan susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada masa mendatang. Hasil hitungan rerata susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada Tabel 4.16. dapat digunakan untuk memperoleh hitungan prediksi susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) yang terjadi. Nilai *ultimate shrinkage* diperoleh dari hubungan antara susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) yang terjadi selama pengujian dengan waktu ( $t/(35+t)$ ). Contoh grafik hubungan susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% yang terjadi selama pengujian dengan waktu ( $t/(35+t)$ ) dapat dilihat pada Gambar 4.12. Sedangkan lebih lengkapnya pada Lampiran E.



Gambar 4.12. *Ultimate Shrinkage* Susut Autogenous (*Autogenous shrinkage*) HVFA-SCC Kadar 35%

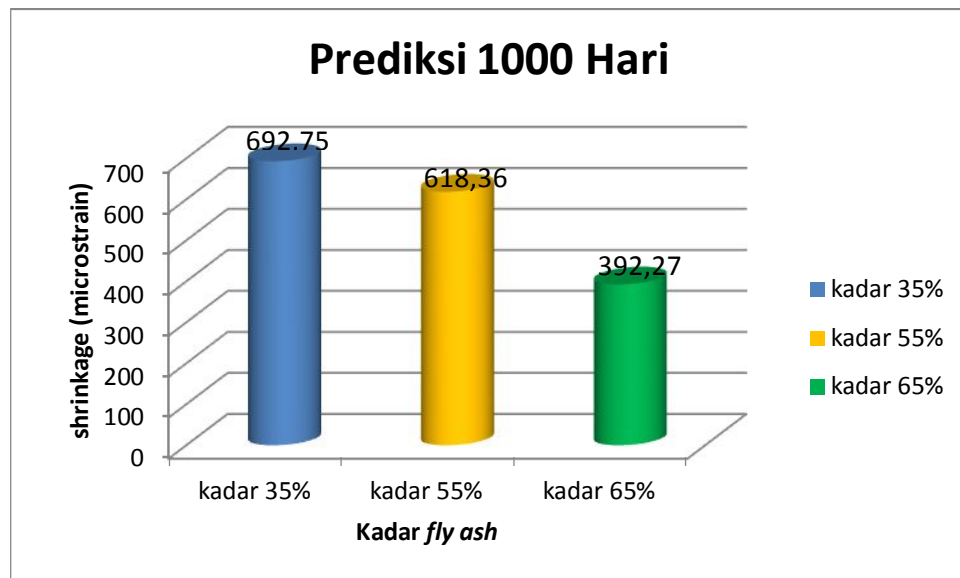
Dari Gambar 4.12. diketahui persamaan regresi linier ( $Y=mx+c$ ) pada benda uji susut kering (*drying shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% adalah  $Y=717.14 x$ , dimana gradien ( $m$ ) adalah nilai *ultimate shrinkage* yaitu sebesar 717 microstrain. Dari nilai *ultimate shrinkage* tersebut, dapat dihitung prediksi *shrinkage* sampai umur 1000 hari dengan menggunakan metode ACI 209R-92.

Gambar 4.13. berikut memperlihatkan hasil prediksi metode ACI 209R-92. Selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.



Gambar 4.13. Prediksi Susut Autogenous Jangka Panjang Dengan Metode ACI 209R-92 Pada Benda Uji Susut Autogenous HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%.

Nilai prediksi susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada umur 1000 hari dapat dilihat pada Gambar 4.14. berikut:

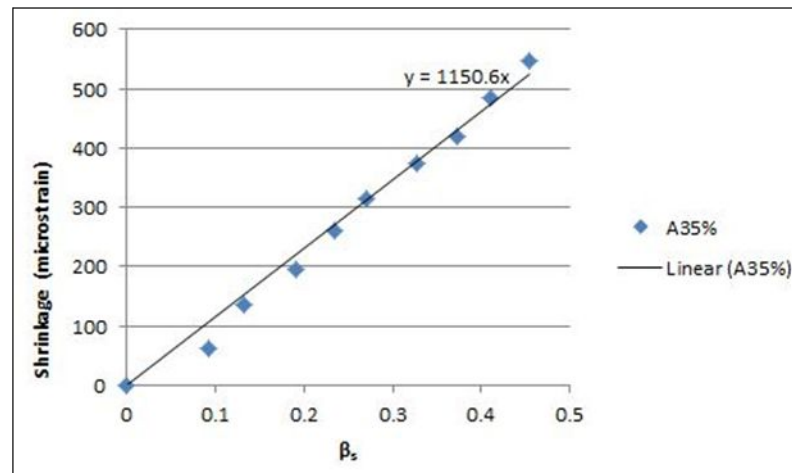


Gambar 4.14. Nilai Prediksi Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*) Pada Umur 1000 Hari Dengan Metode ACI 209R-92

#### 4.5.4. Hasil Hitungan Prediksi Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*) HVFA-SCC Menggunakan CEB-FIP 1990

Berdasarkan pengujian susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) 90 hari, dapat diperkirakan susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada masa mendatang. Hasil hitungan rerata susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada Tabel 4.16. dapat digunakan untuk memperoleh hitungan prediksi susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) yang terjadi berdasarkan metode prediksi dari CEB-FIP 1990. Nilai *ultimate shrinkage* ( $\epsilon_{cs0}$ ) diperoleh dari hubungan antara susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) yang terjadi selama pengujian dengan koefisien pertambahan susut *autogenous* terhadap waktu ( $\beta_s$ ). Contoh grafik hubungan susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% yang terjadi selama pengujian dengan koefisien pertambahan susut *autogenous* terhadap waktu ( $\beta_s$ ) dapat dilihat pada Gambar 4.15. Sedangkan lebih lengkapnya pada Lampiran E.

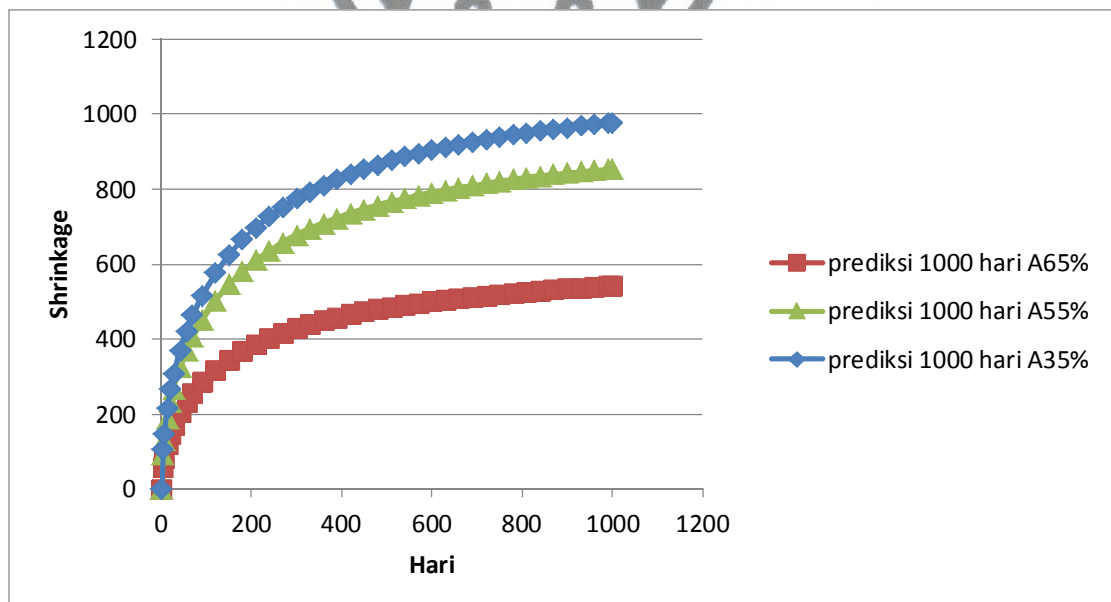




Gambar 4.15. *Ultimate Shrinkage* Susut Autogenous (*Autogenous Shrinkage*) HVFA-SCC Kadar 35%

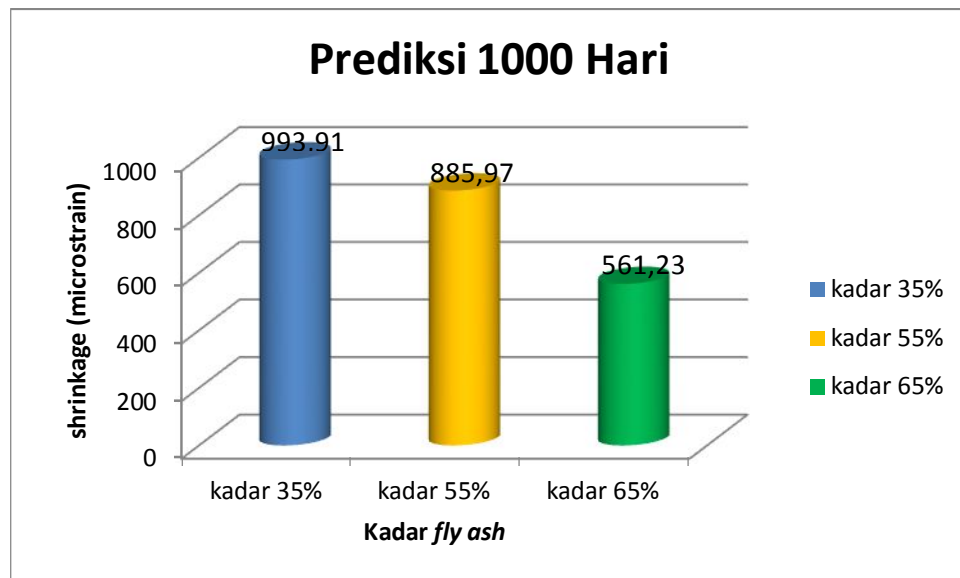
Dari Gambar 4.15. diketahui persamaan regresi linier ( $Y=mx+c$ ) pada benda uji susut kering (*drying shrinkage*) HVFA-SCC kadar 35% adalah  $Y=1150.6x$ , dimana gradien ( $m$ ) adalah nilai *ultimate shrinkage* yaitu sebesar 1151 microstrain. Dari nilai *ultimate shrinkage* tersebut, dapat dihitung prediksi *shrinkage* sampai umur 1000 hari dengan menggunakan metode CEB-FIP 1990.

Gambar 4.16 berikut memperlihatkan hasil prediksi metode CEB-FIP 1990. Gambar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.



Gambar 4.16. Prediksi Susut Autogenous Jangka Panjang Dengan Metode CEB-FIP 1990 Pada Benda Uji Susut Autogenous HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%.

Nilai prediksi susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada umur 1000 hari dapat dilihat pada Gambar 4.17. berikut:



Gambar 4.17. Nilai Prediksi Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*) Pada Umur 1000 Hari Dengan Metode CEB-FIP 1990

#### 4.5.5. Hasil Hitungan Prediksi Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*) HVFA-SCC Menggunakan Ross's Hyperbolic Equation

Berdasarkan pengujian susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) 90 hari, dapat diperkirakan susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada masa mendatang. Hasil hitungan rerata susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada Tabel 4.16. dapat digunakan untuk memperoleh hitungan prediksi susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) yang terjadi berdasarkan metode prediksi Ross's Hyperbolic Equation.

Berikut ini contoh hitungan untuk mendapatkan nilai prediksi susut kering dengan menggunakan Ross's *Hyperbolic Equation* sebagai berikut :

$$\text{Persamaan yang diberikan : } \epsilon_{sh(t)} = \frac{t}{57,4+t} 2,3575 S_{(28)} \quad (4.3)$$

dengan:  $\epsilon_{sh(t)}$  = nilai susut *autogenous* umur t (selama pengujian)

$2,3575 S_{(28)}$  = besar *ultimate shrinkage* ,

$S_{28}$  = shrinkage umur 28 hari

t = umur pengujian (hari)

*commit to user*

Diketahui:  $S_{28}$  = 315,083  $\mu\text{s}$

$$t = 1000 \text{ hari}$$

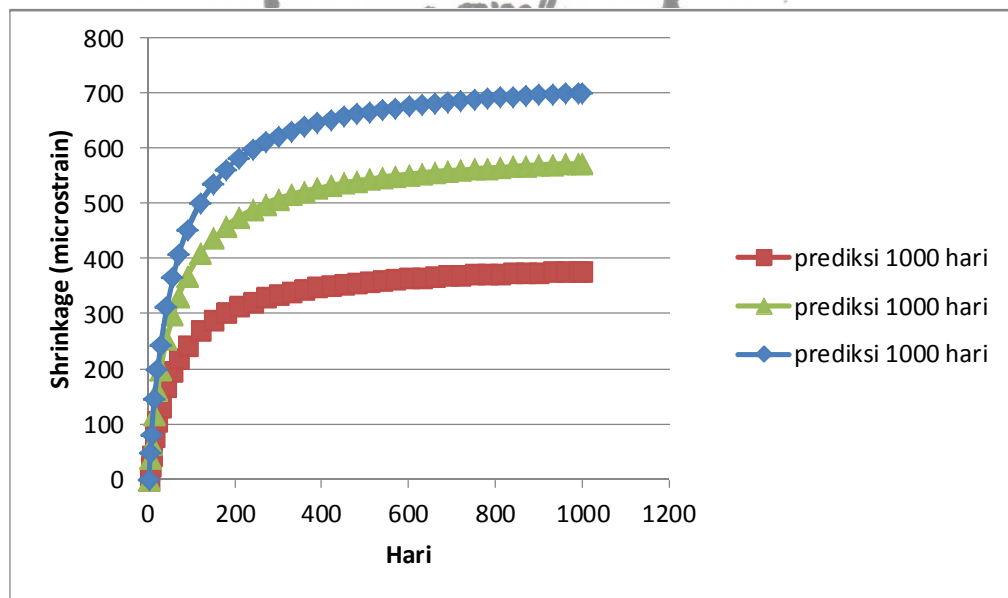
Maka, nilai prediksi *autogenous shrinkage* pada umur 1000 hari ( $\mathcal{E}_{sh(1000)}$ ) adalah:

$$\mathcal{E}_{sh(t)} = \frac{t}{57,4+t} 2,3575 S_{(28)}$$

$$\mathcal{E}_{sh(1000)} = \frac{1000}{57,4+1000} 742,809 \mu s$$

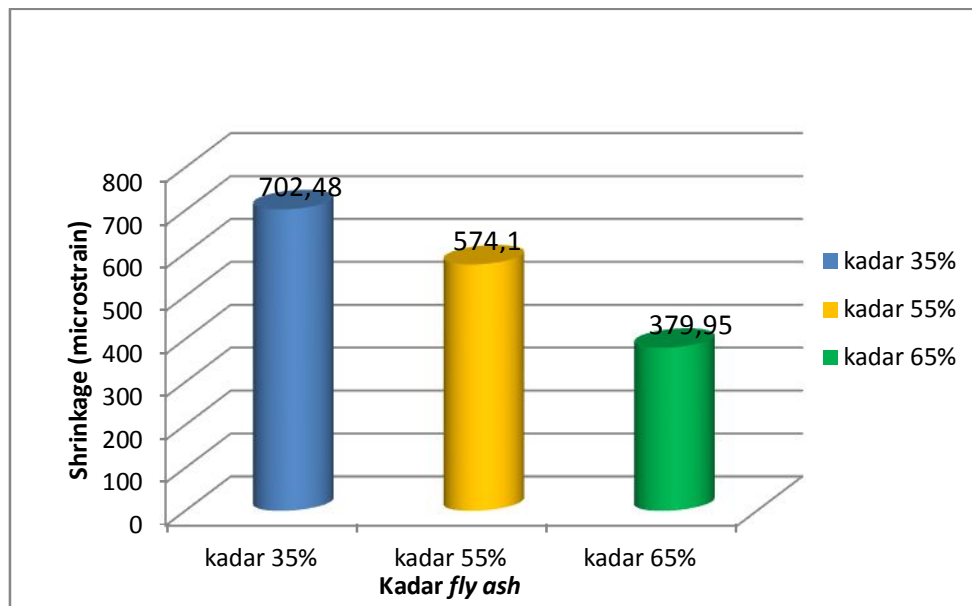
$$\mathcal{E}_{sh(1000)} = 702,4862 \mu s$$

Gambar 4.18 berikut memperlihatkan hasil prediksi metode Ross's *Hyperbolic Equation*. Gambar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.



Gambar 4.18. Prediksi Susut *Autogenous* Jangka Panjang Dengan Metode Ross's Hyperbolic Equation Pada Benda Uji Susut *Autogenous* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%.

Nilai prediksi susut *autogenous* (*autogenous shrinkage*) pada umur 1000 hari dapat dilihat pada Gambar 4.19. berikut:



Gambar 4.19. Nilai Prediksi Susut *Autogenous* (*Autogenous Shrinkage*) Pada Umur 1000 Hari Dengan Metode Ross's *Hyperbolic Equation*

#### 4.6. Evaluasi Metode Prediksi Susut Jangka Panjang

Dalam penelitian ini digunakan tiga metode evaluasi prediksi susut untuk mengetahui tingkat akurasi dari metode prediksi susut jangka panjang tersebut. Metode evaluasi yang digunakan antara lain adalah *Best-Fit Line*, *Residual Analysis*, dan *Coefficient of Variation of Error*. Metode evaluasi *Best-Fit Line* adalah metode sederhana yang membandingkan hasil pengukuran langsung dengan hasil prediksi susut menggunakan rumus prediksi yang kemudian diplotkan dalam gambar untuk mendapatkan fungsi regresi linier. Gradien dari grafik *best-fit line* menunjukkan deviasi dari hasil pengukuran langsung dengan hasil dari prediksi jangka panjang, indikasi sebuah metode prediksi mempunyai keakuratan tinggi adalah ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang semakin dekat dengan nilai 1.

Metode evaluasi *Residual Analysis* adalah metode yang menggunakan selisih dari hasil pengurangan nilai prediksi dengan nilai pengukuran langsung, sehingga didapatkan nilai R. Nilai R dapat berupa nilai positif dan negatif. Nilai R positif menunjukkan bahwa prediksi *overestimate*, sedangkan nilai R negatif menunjukkan prediksi yang bagus. Metode prediksi yang akurat ditunjukkan dalam hasil yang didapatkan dari grafik hubungan nilai R dengan waktu pengujian. Metode prediksi

*commit to user*

yang bagus memiliki hasil berupa rerata nilai R yang rendah dan persentase nilai R di dalam jangkauan 40 *microstrain* yang tinggi.

Metode *Coefficient of Variation of Error* adalah metode yang menghitung *coefficient of variation of error* (M) menggunakan persamaan tertentu. Metode Prediksi yang bagus ditunjukkan dengan hasil nilai M yang rendah.

$$\text{Persamaan yang diberikan : } M = \frac{1}{p} \sum \varepsilon_s \quad \varepsilon_s \quad / \quad 1/ \quad (4.4)$$

dengan:  $\varepsilon_{sh - pr(t)}$  = nilai rerata prediksi susut

$\varepsilon_{sh - p(t)}$  = nilai prediksi susut ,

$\varepsilon_{sh - m(t)}$  = nilai pengukuran susut

t = umur pengujian (hari)

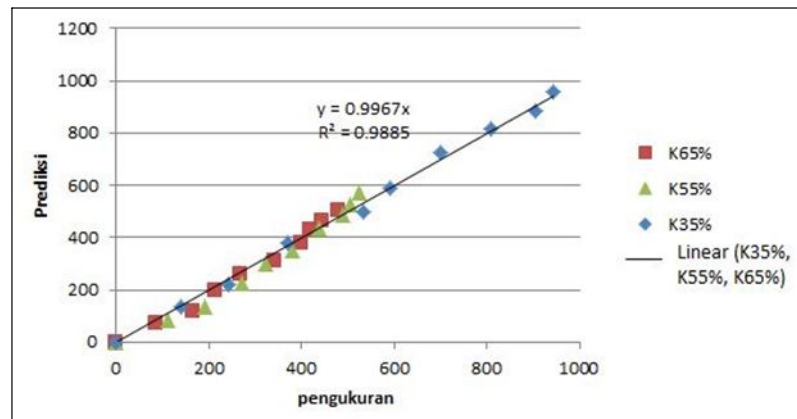
n = jumlah data susut

#### 4.6.1. Evaluasi Metode Prediksi Susut Jangka Panjang Menggunakan Metode *Best-Fit Line*, *Residual Analysis*, dan *Coefficient of Variation of Error*

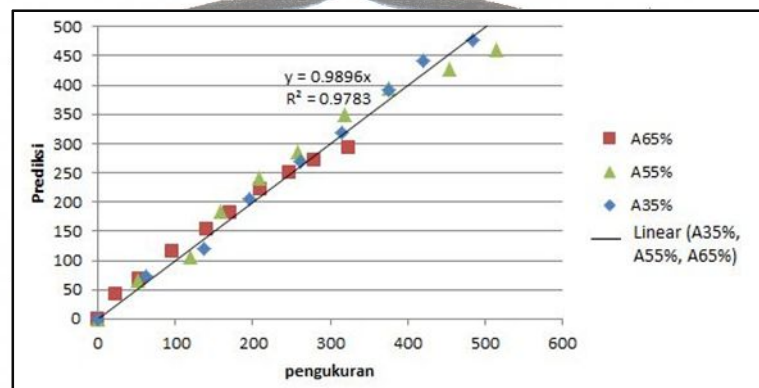
Dalam penelitian ini metode yang akan dievaluasi adalah metode prediksi dari ACI 209R-92, CEB-FIP 1990, dan Ross's *Hyperbolic Equation*. Metode prediksi tersebut digunakan dalam memprediksi susut kering dan *autogenous*. Susut kering menggunakan metode ACI 209R-92 dan CEB-FIP 1990, sedangkan susut *autogenous* menggunakan metode ACI 209R-92, CEB-FIP 1990, dan Ross's *Hyperbolic Equation*. Selanjutnya akan disajikan hasil evaluasi menggunakan metode *Best-Fit Line*, *Residual Analysis*, dan *Coefficient of Variation of Error*.

Gambar 4.20 berikut memperlihatkan hasil evaluasi *best-fit line* diperoleh dari perbandingan susut pengukuran langsung dengan hasil prediksi susut menggunakan rumus prediksi. Gambar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.

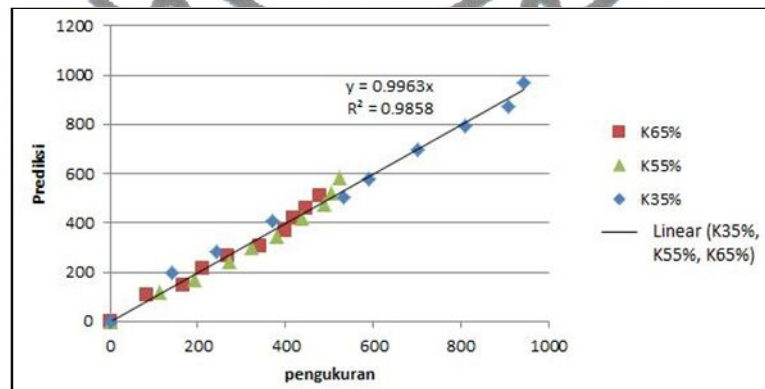




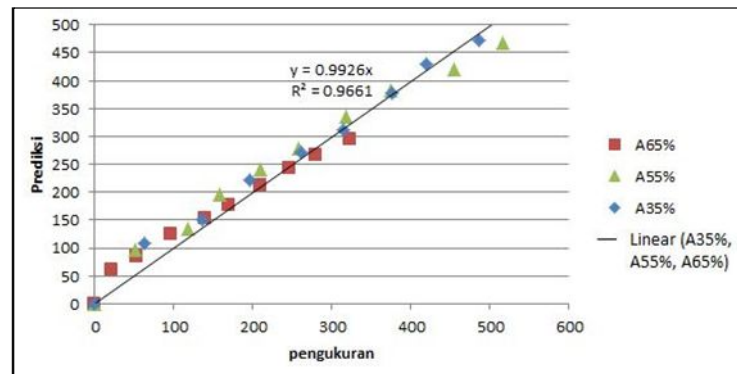
a



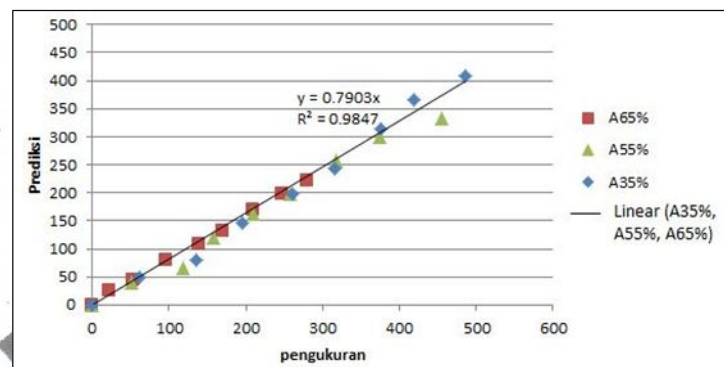
b



c



d

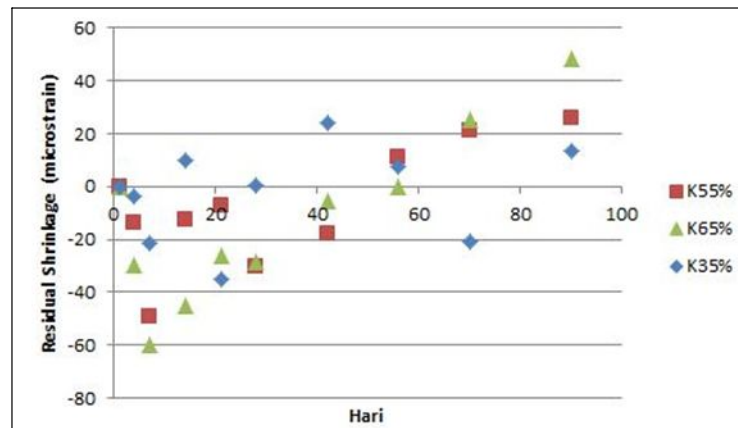


e

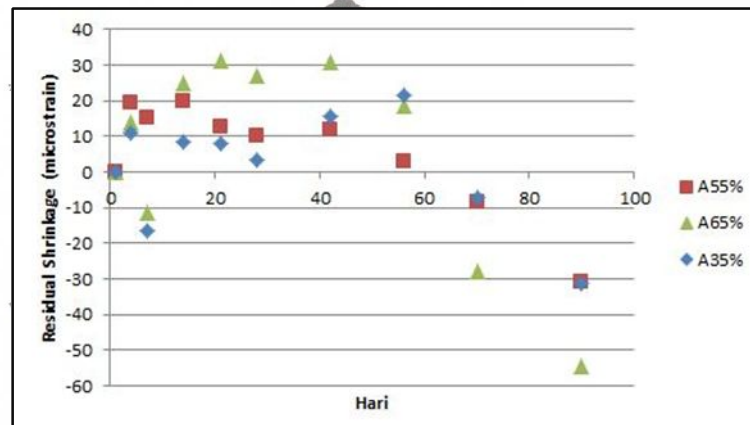
Gambar 4.20. Metode Evaluasi *Best-Fit Line* Pada Prediksi Susut Kering dan *Autogenous* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%.

- ACI 209R-92 (susut kering kadar 35%, 55%, dan 65%)
- ACI 209R-92 (susut *autogenous* kadar 35%, 55%, dan 65%)
- CEB-FIP 1990 (susut kering kadar 35%, 55%, dan 65%)
- CEB-FIP 1990 (susut *autogenous* kadar 35%, 55%, dan 65%)
- Ross's *Hyperbolic Equation* (susut *autogenous* kadar 35%, 55%, dan 65%)

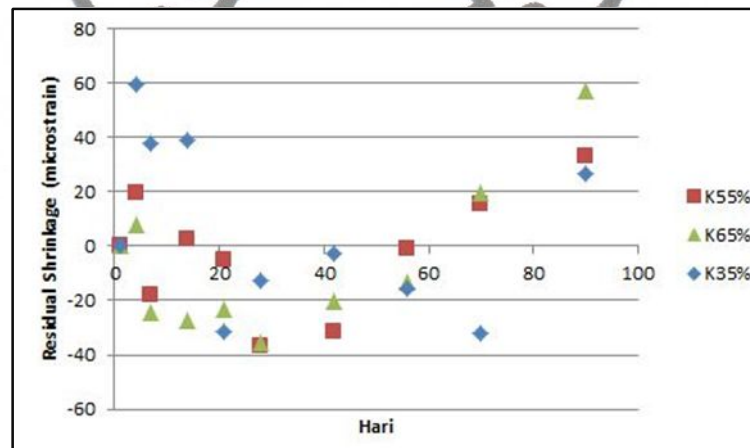
Gambar 4.21 berikut memperlihatkan hasil evaluasi *residual analysis* diperoleh dari selisih dari hasil pengurangan nilai prediksi dengan nilai pengukuran langsung, sehingga didapatkan nilai R. Gambar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.



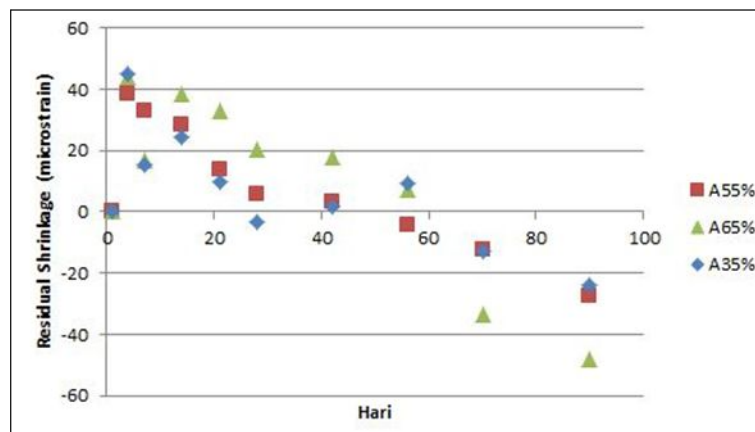
a



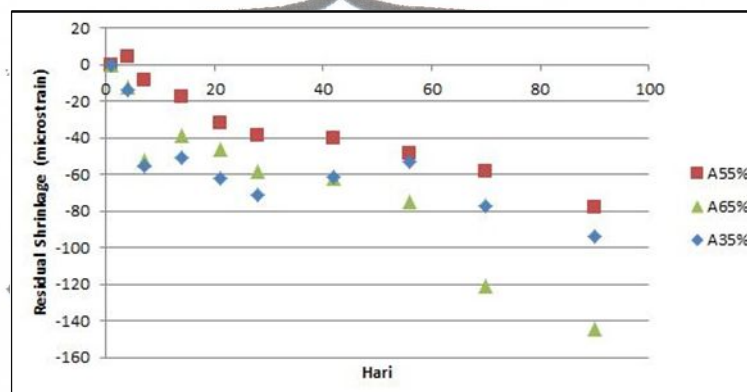
b



c



d



e

Gambar 4.21. Metode Evaluasi *Residual Analysis* Pada Prediksi Susut Kering dan *Autogenous* HVFA-SCC Kadar 35%, 55%, dan 65%.

- ACI 209R-92 (susut kering kadar 35%, 55%, dan 65%)
- ACI 209R-92 (susut *autogenous* kadar 35%, 55%, dan 65%)
- CEB-FIP 1990 (susut kering kadar 35%, 55%, dan 65%)
- CEB-FIP 1990 (susut *autogenous* kadar 35%, 55%, dan 65%)
- Ross's *Hyperbolic Equation* (susut *autogenous* kadar 35%, 55%, dan 65%)

Tabel 4.18. berikut menampilkan hasil evaluasi *Coefficient of Variation of Error* berupa nilai M. Langkah-langkah hitungan dan gambar selengkapnya dapat dilihat pada lampiran E.

Tabel 4.18. Hasil Evaluasi Menggunakan *Coefficient of Variation of Error* Berupa Nilai M

M	ACI 209R-92	CEB-FIP 1990	Ross
Susut Kering (35%, 55%, 65%)	0.185549767	0.188571911	-
Susut <i>Autogenous</i> (35%, 55%, 65%)	0.234082918	0.269563924	0.880566464

Berikut ini adalah ringkasan hasil evaluasi terhadap metode prediksi susut jangka panjang yang selanjutnya digunakan untuk menentukan metode prediksi yang terbaik.

Tabel 4.19. Hasil Evaluasi Metode *Best-Fit Line* ( $R^2$ )

$R^2$	ACI 209R-92	CEB-FIP 1990	Ross
Susut Kering (35%, 55%, 65%)	0.9885	0.9783	-
Susut <i>Autogenous</i> (35%, 55%, 65%)	0.9858	0.9661	0.9847

Tabel 4.20. Hasil Evaluasi Metode *Residual Analysis* (R)

Average R	ACI 209R-92	CEB-FIP 1990	Ross
Susut Kering (35%, 55%, 65%)	-7.341316406	-0.382330637	-
Susut <i>Autogenous</i> (35%, 55%, 65%)	3.962826488	8.299725296	-48.8968552
Range inside $40(10^{-6})$	ACI 209R-92	CEB-FIP 1990	Ross
Susut Kering (35%, 55%, 65%)	86.7%	90.0%	-
Susut <i>Autogenous</i> (35%, 55%, 65%)	96.7%	90.0%	40.0%

Tabel 4.21. Hasil Evaluasi Metode *Coefficient of Variation of Error* (M)

M	ACI 209R-92	CEB-FIP 1990	Ross
Susut Kering (35%, 55%, 65%)	0.185549767	0.188571911	-
Susut <i>Autogenous</i> (35%, 55%, 65%)	0.234082918	0.269563924	0.880566464

Dari ketiga hasil evaluasi tersebut, dapat dijadikan acuan untuk menentukan metode prediksi yang paling bagus diantara metode prediksi yang lainnya. Berikut hasil peringkat berdasarkan data evaluasi untuk susut kering HVFA-SCC kadar 35%, 55%, dan 65% berturut-turut adalah ACI 209R-92, CEB-FIP 1990. Hasil peringkat berdasarkan data evaluasi untuk susut *autogenous* HVFA-SCC kadar 35%, 55%, dan 65% berturut-turut adalah ACI 209R-92, Ross's *Hyperbolic Equation*, dan CEB-FIP 1990.



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari seluruh pengujian, analisis data, dan pembahasan yang dilakukan dalam penelitian ini, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

- a. Penggantian sebagian semen dengan *fly ash* pada *high volume fly ash self compacting concrete* cenderung mengurangi nilai susut kering dan *autogenous* pada beton. Semakin banyak kadar *fly ash* (kadar 65%) yang digunakan pada *high volume fly ash self compacting concrete* maka semakin rendah nilai susut kering dan *autogenous* yang terjadi dibanding dengan variasi kadar *fly ash* 35% dan 55%.
- b. Pada kadar variasi *fly ash* sebesar 65 % dengan umur beton 90 hari memiliki nilai susut kering dan *autogenous* yang lebih kecil dari kadar variasi *fly ash* 35 % dan 55 %, nilai prediksi susut kering dan *autogenous* kadar 65% pada umur 1000 hari berdasarkan metode ACI 209R-92 berturut-turut adalah 676.328 microstrain dan 379,95 microstrain.
- c. Metode prediksi terbaik untuk susut kering adalah ACI 209R-92, susut *autogenous* adalah ACI 209R-92

#### 5.2. Saran

Untuk menindaklanjuti penelitian ini kiranya perlu dilakukan beberapa koreksi agar penelitian-penelitian selanjutnya dapat lebih baik. Adapun saran-saran untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Menempatkan *demec point* secara tepat pada benda uji agar tidak bergeser saat diukur.
2. Memastikan *demec gauge* telah dikalibrasi terlebih dahulu sebelum digunakan.

*commit to user*

3. Memperbanyak rentang pengukuran benda uji untuk setiap jenis variasi kadar *fly ash* agar data hasil pengujian yang dihasilkan lebih akurat dan tidak bertolak belakang dengan landasan teori dan selisih data dari rumus prediksi dengan data hasil percobaan lebih kecil.

