



Study Pembuatan *Durable Cement* dengan Penambahan *Pozzolan Silica Fume*

Nanik Hendrawati*, Endah Dwi Rahmayanti, Evi Dyah Priapnasar

Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno-Hatta No.9, 65141, Malang, Indonesia

*E-mail: nanik.hendrawati@polinema.ac.id

ABSTRAK

Selama ini *silica fume* dikenal sebagai bahan campuran pembuatan beton karena dapat meningkatkan kuat tekan beton, menurunkan permeabilitas beton dan memiliki ketahanan sulfat yang tinggi. Dalam penelitian ini mencoba mengaplikasikan *silica fume* pada pembuatan *durable cement*. *Silica fume* dijadikan sebagai bahan *pozzolan* karena didalamnya mengandung *silica* tinggi yang bersifat reaktif agar dapat meningkatkan ketahanan terhadap sulfat. Bahan *pozzolan* ini dapat bereaksi dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pada suhu biasa untuk membentuk senyawa bersifat semen. Pada penelitian ini *silica fume* divariasikan mulai dari 0; 7,5; 15; 22,5; 30; 37,5%. *Durable cement* ini akan diuji ketahanan sulfatnya dengan menggunakan metode pengujian kuat tekan. Hasil percobaan menunjukkan terjadinya penurunan nilai kuat tekan sampel pada umur 7 dan 28 hari jika dibandingkan dengan blanko. Hal ini disebabkan lambatnya reaksi *pozzolan (silica fume)*. Namun proses peningkatan kuat tekannya akan terus berlanjut hingga setelah umur 360 hari. Jika dibandingkan dengan Standar Nasional Indonesia (15-0302-2004) semen PPC tipe IP-K, hasil sampel *durable cement* masih memenuhi standar untuk variabel dengan penambahan *silica fume* antara 7,5% sampai 22,5%.

Kata kunci: *Silica Fume, Durable Cement, Pozzolan, Ketahanan Sulfat, Kuat Tekan*

ABSTRACT

Silica fume is known as a mixture of concrete manufacturing since it can increase the compressive strength of concrete, decrease the permeability of concrete and have a high resistance to sulfates. In this research, try applying *silica fume* to make *durable cement*. *Silica fume* is converted to *pozzolan* because it contains highly reactive *silica* to increase sulfate resistance. This *pozzolan* material can react with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ at a room temperature to form a cement compound. In this study, *silica fume* was varied from 0; 7.5; 15; 22.5; 30; 37.5%. The *durable cement* will be tested for its resistance to sulfates by using a compression resistance test method. The results showed that the compressive strength of the sample was decreased at 7 and 28 days compared to the blanks. This is due to the slow reaction of *pozzolan (silica fume)*. But the process of increasing the resistance to compression will continue until after 360 days. Compared with Indonesia cement national standard (15-0302-2004) of PPC type IP-K, the *durable cement* sample still meets the standard for variables with the addition of *silica fume* between 7.5% and 22.5%.

Keywords: *Silica Fume, Durable Cement, Pozzolan, Sulfate Resistance, Compressive Strength*

1. PENDAHULUAN

Semen merupakan salah satu komoditas penting bagi Indonesia untuk mendukung program pembangunan dan infrastrukturnasional. Perkembangan ekonomi yang terus meningkat setiap tahunnya sangat berpengaruh terhadap percepatan infrastruktur tiap wilayah di Indonesia. Ini yang mendasari

bermunculannya program – program baru pemerintah di bidang pembangunan guna memenuhi kebutuhan rakyat Indonesia yang semakin beragam. Sejumlah program dan proyek yang direncanakan misalnya seperti pembangunan pelabuhan, pembangunan waduk hingga tol laut.

Dalam program pemerintah tersebut, tentunya banyak proyek yang akan

membutuhkan jenis semen khusus untuk menunjang kesuksesan program itu sendiri. Biasanya semen yang sering kita temui dipasaran hanya dapat digunakan untuk bahan konstruksi biasa. Untuk mendapatkan kualitas semen yang lebih baik, maka perlu dilakukan study lebih lanjut mengenai inovasi pembuatan semen.

Selama ini *silica fume* dikenal sebagai bahan campuran pembuatan beton karena dapat meningkatkan kuat tekan beton, menurunkan *permeabilitas* beton dan memiliki ketahanan sulfat yang tinggi. Menurut Bagus, dkk [1] *durabilitas* beton merupakan salah satu persyaratan dalam dunia konstruksi, dimana beton harus tahan terhadap serangan kimia yang berasal dari lingkungan [1].

Silica fume bekerja di beton dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu faktor fisik dan kimia. Dari segi fisik, kehadiran jenis partikel sangat kecil akan meningkatkan sifat beton. Dari segi kimia, *silica fume* adalah bahan *pozzolan* yang sangat efektif. Zona transisi adalah lapisan tipis antara massal terhidrasi pasta semen dan partikel *agregat* beton. Zona ini adalah komponen yang paling lemah dalam beton, dan juga daerah paling *permeabel*. *Silica fume* memainkan peranan penting dalam zona transisi melalui kedua efek fisik dan kimia [2].

Silica fume dapat menghasilkan penurunan yang sangat besar dalam *permeabilitas*, tergantung pada campuran desain dan dosis *silica fume*. *Permeabilitas* adalah tingkat derajat kerapatan konstruksi beton untuk dapat ditembus zat cair (misalnya air) [3].

Menurut penelitian yang dilakukan Muhammad Afif yang berjudul pengaruh penambahan *silica fume* dan *superplasticizer* dengan pemakaian semen tipe *PPC* dan *PCC* terhadap peningkatan mutu beton menyebutkan prosentase kuat tekan beton dengan bahan tambah *silica fume* lebih tinggi dibandingkan dengan beton tanpa *silica fume*. Hal ini dikarenakan penggunaan bahan tambah *silica fume* yang bersifat *pozzolanic* dengan ukuran butiran $0,1 \mu\text{m}$ sehingga pori-pori dalam beton dapat terisi oleh *silica fume*,

sehingga kuat tekan beton dengan penggunaan *silica fume* lebih tinggi dibandingkan kuat tekan beton tanpa *silica fume*.

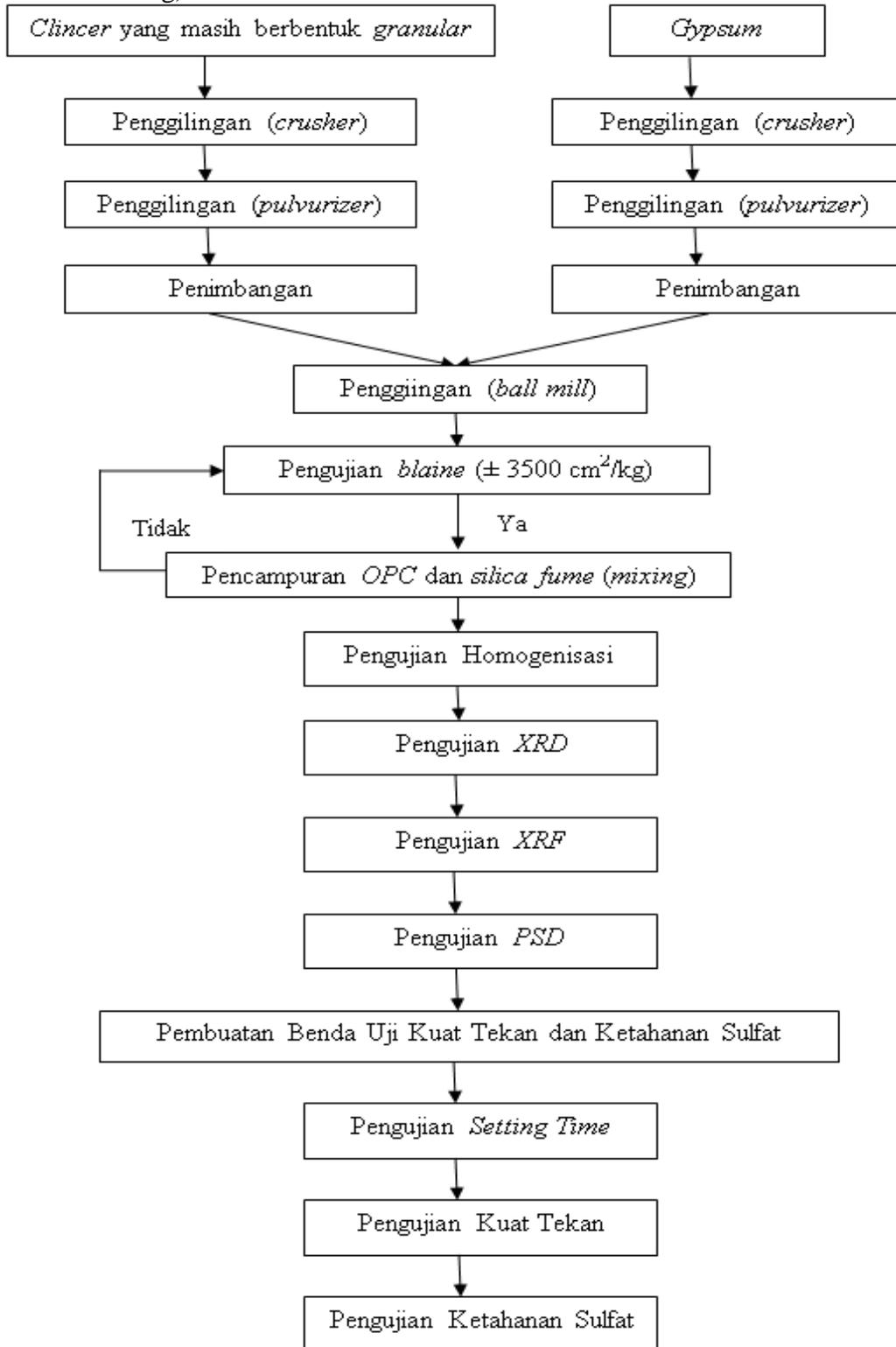
Dari beberapa kelebihan *silica fume* diatas, kami mencoba mengaplikasikannya pada pembuatan semen. *Silica fume* dijadikan sebagai bahan *pozzolan* yang didalamnya mengandung *silica* tinggi yang bersifat reaktif. Bahan *pozzolan* ini dapat bereaksi dengan Ca(OH)_2 pada suhu biasa untuk membentuk senyawa bersifat semen. Produk ini bisa disebut dengan Semen *durable* atau inovasi produk semen yang dapat tahan lama. Dengan dilakukannya penelitian ini diharapkan didapatkannya data dasar yang menjadi pijakan pengembangan selanjutnya *durable cement* untuk memenuhi kebutuhan pasar dengan spesifikasi khusus terutama pada *durabilitas* dan ketahanan sulfat pada bangunan struktur dan dapat membantu program pengembangan *durable cement* di PT Semen Indonesia (Persero) Tbk.

2. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *experiment* skala laboratorium, membandingkan *durable cement* hasil penelitian dengan *Portland Pozzoland Cement* tipe *IP-K* dan penambahan % berat *silica fume* sebagai variabelnya. Pembuatan *durable cement* dimulai dengan proses *grinding terak* dan *gypsum* menjadi *Ordinary Portland Cement* dan dilanjutkan penambahan bahan *pozzolan* berupa *silica fume*.

Clinker yang masih berupa granular dan *gypsum* masing-masing dimasukkan kedalam *crusher* untuk dihaluskan. Hasil dari *crusher* yang berupa butiran kasar dimasukkan kedalam *pulverized* untuk membuat partikel yang lebih kecil. *Clinker* dan *gypsum* yang sudah dihaluskan masing-masing ditimbang sesuai dengan variabel yang sudah ditentukan. Masing-masing variabel dicampur dan dimasukkan kedalam *ball mill* untuk dihaluskan. Hasil dari *ball mill* kemudian dilakukan pengujian *blaine*

untuk mengetahui tingkat kehalusannya (blaine $\pm 3500 \text{ cm}^2/\text{kg}$).



Gambar 1. Preparasi bahan dan pengujian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

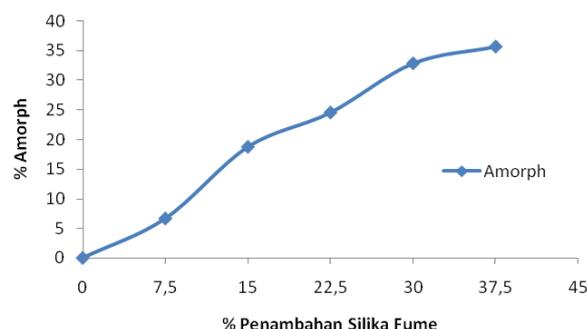
3.1 Uji Homogenisasi Sampel *Durable Cement*

Sebelum dilakukan pengujian selanjutnya sampel durable cement diuji homogenisasi yang bertujuan untuk mengetahui pemerataan pencampuran sampel. Pengujian homogenisasi dilakukan dengan perhitungan uji F menggunakan data hasil alat XRD dan PSD.

Diperoleh hasil pengujian homogenisasi sampel B (Fhitung 4,723) dan F (Fhitung 4,616), dimana Ftabelnya 4,95. Menurut Matondang [4], syarat pengujian F, sampel dikatakan homogen ketika nilai F hitung < F tabel, sehingga sampel durable cement dapat dikatakan homogeny [4].

3.2 Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kadar Amorph dan C3A

Kadar *amorph* dan *C3A* dianalisa dengan menggunakan alat XRD (*X-Ray Diffraction*). Pengujian XRD *silica fume* bertujuan untuk mengetahui kadar *keamorfannya*. Diperoleh kadar keamorfannya sebesar 93,91%. Semakin tinggi kadar *amorph* pada *silica fume* dapat meningkatkan reaktifitas yang terjadi antara *silica* aktif dengan *kalsium hidroksida*. Menurut Ade Ilham (2005), *pozzolan* harus berada dalam keadaan yang *amorph* supaya dapat beraksi dengan $Ca(OH)_2$. Fungsi penambahan *silica fume* nantinya untuk mereaksikan *kalsium hidroksida* yang merupakan hasil samping yang dapat menyebabkan kerusakan pada semen, dengan bahan aktif yang ada pada *silica fume* berupa *silica* [5].



Gambar 2. Kurva Kadar *Amorph* vs % Penambahan *Silica Fume*

Gambar diatas menunjukkan bahwa semakin banyak persen penambahan *silica fume* pada sampel menyebabkan kadar *amorph* semakin tinggi. Semakin tinggi kadar *amorph* dapat meningkatkan reaktifitas yang terjadi antara *silica aktif* dengan *kalsium hidroksida*. Diperoleh kadar *amorph* masing-masing sampel secara berurutan sebesar 0; 6,67; 18,76; 24,56; 32,86; dan 35,69 %.

Tabel 1. Kadar *C3A durable cement* dan nilai *Rwp*

Pengujian XRD	% Penambahan Silika Fume					
	0	7,5	15	22,5	30	37,5
C3A (%)	7,55	6,9	6,81	6,18	5,63	5,77
Rwp	7,595	6,789	6,909	6,470	6,654	6,411

(Sumber : Hasil Pengujian XRD *Durable Cement*)

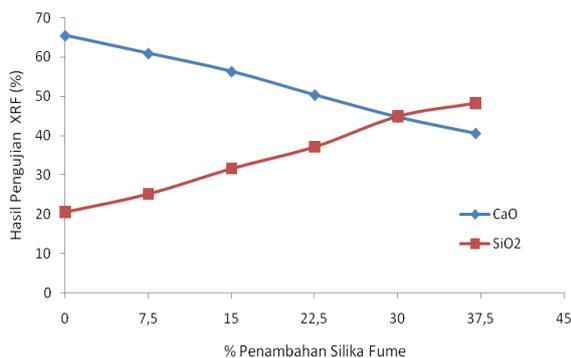
Tabel diatas menunjukkan semakin banyak persen penambahan *silica fume* menyebabkan kadar *C3A* dalam sampel semakin berkurang. Menurut Susanti [6] semakin kecil persen *C3A* dalam semen dapat meningkatkan ketahanan sulfatnya [6]. Reaksi antara *C3A* dengan sulfat dapat menimbulkan korosi pada beton. Diperoleh kadar *C3A* masing masing sampel sebesar 7,55; 6,9; 6,81; 6,18; 5,63; dan 5,77%.

Keseluruhan hasil analisa diatas diambil dari hasil pengujian XRD dengan nilai *Rwp* kurang dari 10. *Rwp* (*Residual Weighted Pattern*) sendiri merupakan indikator keakuratan analisa XRD dimana semakin kecil nilai *Rwp*nya, semakin akurat hasil analisa tersebut. Sehingga dapat disimpulkan bahwa data hasil analisa XRD diatas akurat.

3.3 Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kadar SiO_2 Dalam Semen

Pengujian XRF (*X-Ray Fluorecence*) *silica fume* bertujuan untuk mengetahui kadar SiO_2 menggunakan alat *Bruker XRF S8 Tiger*. Diperoleh hasil pengujian kadar unsur SiO_2 dalam *silica fume* sebesar 87,65%. SiO_2 berperan mengurangi *kalsium hidroksida* yang terbentuk dari hasil samping proses hidrasi semen, karena *kalsium hidroksida* dapat menimbulkan kerusakan/ keretakan pada semen. Sehingga dengan kadar SiO_2

yang tinggi, semakin berkurang *kalsium hidroksida* yang terbentuk.



Gambar 3. Kadar *CaO* dan *SiO₂* dalam Sampel *Durable Cement*

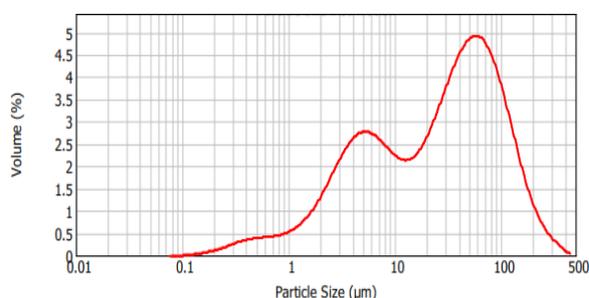
Hasil pengujian *XRF durable cement* menunjukkan semakin banyak persen penambahan *silica fume* menyebabkan semakin banyak kadar *SiO₂* seperti yang terlihat pada Gambar 4.2. Hal ini dikarenakan adanya kontribusi *SiO₂* dari *silica fume*. Kadar *SiO₂* dari sampel A sampai F masing-masing sebesar 20,25; 25,18; 31,66; 37,22; 45; dan 48,36%.

Ketika *SiO₂* semakin banyak, justru kadar *CaO* dalam *durable cement* semakin berkurang. Penambahan *silica fume* selain dapat menambah ketahanan sulfat semen itu sendiri, juga untuk mensubstitusi penggunaan *clincer* karena harganya yang mahal. Sedangkan *silica fume* sendiri merupakan limbah pabrik kaca yang mempunyai kadar *silika* yang tinggi. *CaO* merupakan unsur yang paling banyak dalam *clincer*, karena itu semakin berkurang *clincer* yang digunakan menyebabkan semakin berkurang pula kadar *CaO*nya. Kadar *CaO* dari sampel A sampai F masing-masing sebesar 65,47; 60,92; 56,31; 50,33; 44,68; dan 40,53%.

3.4 Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Distribusi Ukuran Partikel Semen

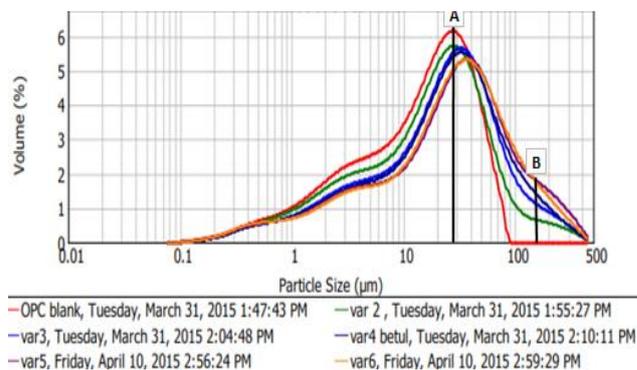
Distribusi ukuran partikel dianalisa dengan menggunakan alat *PSD (Particle Size Distribution)*. Pengujian *PSD* ini dilakukan

untuk mengetahui distribusi ukuran partikel *silica fume* dan *durable cement* dengan instrumen *Malvern Instruments Ltd*, dengan bantuan program *Mastersizer 2000 ver.5.60*. Kategori kehalusan butiran dalam pembacaan instrumen *Malvern* berkisar antara 45 μ m.



Gambar 4. Hasil Pengujian *Particle Size Distribution (PSD) Silica Fume*

Hasil pengujian *silica fume* diperoleh ketika 45 μ m partikel yang lolos sebesar 62,38%. Dapat dikatakan *silica fume* yang digunakan sedikit kasar. Hal ini dikarenakan *silica fume* yang digunakan tidak melalui proses penggilingan. *Silica fume* yang digunakan pada penelitian ini merupakan hasil granulasi dari limbah pabrik kaca.



Gambar 5. Hasil Pengujian *Particle Size Distribution (PSD) Durable Cement*

Hasil pengujian *Particle Size Distribution (PSD) durable cement* diperoleh partikel yang lolos 45 μ m (325 mesh) pada sampel A 89,42; B 81,06; C 74,95; D 71,24; E 66,14; dan F 66,78%. Data diatas menunjukkan semakin banyak penambahan *silica fume* pada sampel mengakibatkan berkurangnya

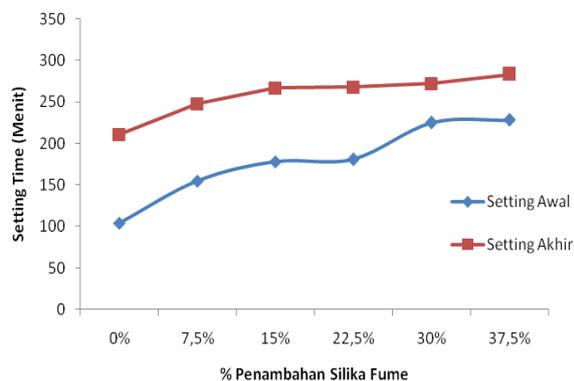
persen partikel sampel yang lolos. Hal ini menunjukkan semakin kasar partikel semen tersebut.

Menurut Tjorodimuljo [7] semakin halus permukaan butir-butir semen semakin cepat proses hidrasinya. Sehingga dapat dikatakan sampel *durable cement* ini akan memiliki proses hidrasi yang lambat dikarenakan ukuran partikel yang kurang halus [7].

Garis lurus A pada gambar diatas menunjukkan perubahan peak yang diakibatkan berkurangnya kadar campuran *clincer* dan *gypsum*, yang digantikan oleh penambahan *silica fume*. Sedangkan garis lurus B menunjukkan perubahan peak akibat penambahan *silica fume*.

3.5 Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Setting Time

Pengujian *Setting time* bertujuan untuk menentukan waktu yang diperlukan semen untuk mengeras, tehitung dari mulai bereaksi dengan air dan menjadi pasta semen hingga pasta semen cukup kaku untuk menahan tekanan. Metode pengujian *setting time* disini menggunakan metode ASTM C191-99/SNI/EN196-3.



Gambar 6. Hasil Pengujian *Setting Time Durable Cement*

Pada gambar diatas diperoleh hasil pengujian *setting time durable cement*, waktu ikat awal masing-masing sampel sebesar 104; 155; 178; 181; 225; dan 228 menit. Sedangkan waktu ikat akhir masing-masing sebesar 211; 248; 267; 268; 272; dan 283 menit.

Semakin banyak penambahan *silica fume* semakin lama *setting awal* maupun *setting akhir* yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian yang dilakukan Sebayang [8] tentang sifat mekanik beton dengan bahan tambahan *silica fume*, semakin besar presentase abu *silica fume* maka waktu pengikatan awal maupun akhir semakin lambat [8].

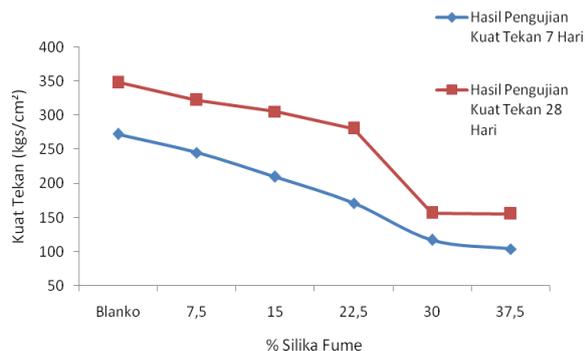
Menurut standart SNI 15-0302-2004 semen *Portland Pozzolan Cement (PPC)* jenis *IP-K*, waktu pengikatan awal tidak boleh kurang dari 45 menit, dan waktu pengikatan akhir tidak boleh lebih dari 7 jam (420 menit). Hal ini menunjukkan bahwa hasil *setting time durable cement* sudah memenuhi standart SNI yang telah ditetapkan [9].

3.6 Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Kuat Tekan Mortar

Pengujian kuat tekan bertujuan untuk mengetahui kekuatan semen. Metode pengujian kuat menggunakan ASTM C 109M-99/SNI 15-2049/EN 196-1. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan menggunakan alat pengujian kuat tekan *mortar* dan dilakukan pada umur benda uji *mortar* 7 hari dan 28 hari [10.11]. Pada pengujian kuat tekan ini dilakukan dengan proses *curing* bertujuan untuk memenuhi hilangnya ar pada *mortar* sehingga proses hidrasi pada *mortar* berjalan dengan baik.

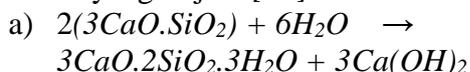
Diperoleh hasil pengujian kuat tekan perendaman 7 hari maupun 28 hari terjadi penurunan dari sampel blanko (penambahan *silica fume* 0%) ke sampel F (penambahan *silica fume* 37,5%). Hal ini dikarenakan sampel *durable cement* termasuk dalam semen *PPC* (*Portland Pozzolan cement*) dimana reaksi *pozzolan* yang terjadi berjalan lambat jika dibandingkan dengan semen *OPC* (*Ordinary Portland Cement*).

Dari hasil penelitian yang dilakukan Refnita dkk [12], kuat tekan beton dengan penambahan *fly ash* (*pozzolan*) mengalami peningkatan yang lambat dan baru mencapai kuat tekan optimal pada umur 90 hari [12].

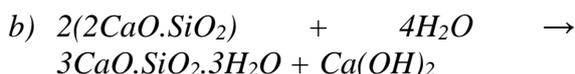


Gambar 7. Hasil Pengujian Kuat Tekan Durable Cement 7 Hari dan 28 Hari

Hal ini terjadi karena *kalsium silikat hidrat (C-S-H)* yang dihasilkan melalui reaksi *pozzolanik* akan bertambah keras dan kuat seiring dengan berjalannya waktu. Reaksi hidrasi yang terjadi [13]:

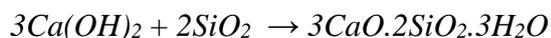


Tricalcium Silikat(C3S) + Air → Calcium Silikat Hidrat(CSH) + Kalsium Hidroksida



Dicalcium Silicate(C2S) + Air → Calcium Silikat Hidrat(CSH) + Kalsium Hidroksida

Reaksi Pozzolan yang terjadi [14] :



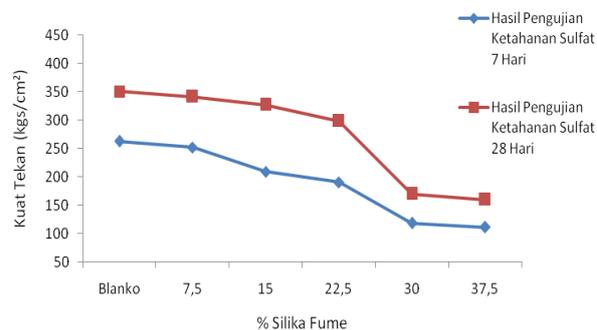
Menurut departemen litbang PT Semen Indonesia (Persero) Tbk, adanya bahan *pozzolan* pada *Portland Pozzolan Cement (PPC)* maka akan memberikan dampak kuat tekan akhir yang lebih tinggi karena proses hidrasi dari semen *PPC* akan terus berkelanjutan meskipun setelah 360 hari.

Menurut Standart SNI semen *PPC* jenis *IP-K*, kuat tekan yang dihasilkan minimal 165 kg/cm² untuk pengujian 7 hari dan minimal 205 kg/cm² untuk pengujian 28 hari. Dari data tersebut baik hasil kuat tekan pengujian 7 hari maupun 28 hari, variabel B sampai D (*silica fume* 7,5% sampai 22,5%) sudah

sesuai dengan standart SNI semen *PPC* jenis *IP-K*. Namun pada variabel E dan F kuat tekan yang dihasilkan dibawah standart SNI. Hal ini menunjukkan % penambahan *silica fume* pada variabel B sampai D masih layak digunakan untuk mengganti *clincer* dalam semen.

3.7 Pengaruh Penambahan Silica Fume Terhadap Ketahanan Sulfat Mortar

Pengujian ketahanan sulfat bertujuan untuk mengetahui sejauh mana semen tersebut (*mortar*) dapat bertahan terhadap serangan sulfat. Metode pengujian dilakukan dengan merendam mortar dalam larutan natrium sulfat.

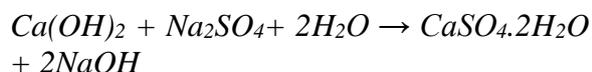
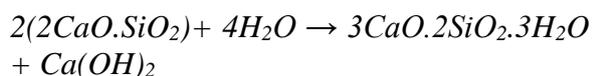
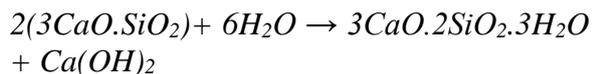


Gambar 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan Durable Cement 7 Hari dan 28 Hari

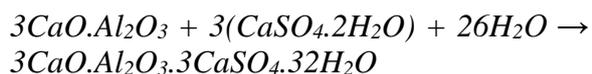
Hasil pengujian kuat tekan dengan perendaman sulfat pada perendaman 7 hari maupun 28 hari juga mengalami penurunan kuat tekan jika dibandingkan dengan blanko seperti yang terjadi pada kuat tekan dengan rendaman air. Hal ini juga dipengaruhi lambatnya reaksi hidrasi maupun *pozzolan* yang terjadi didalam *mortar*.

Portland Pozzolan Cement (PPC) yang mengandung bahan *pozzolan* berupa *silica aktif* dapat meningkatkan kuat tekan ketika direndam dalam sulfat, dikarenakan ketika $Ca(OH)_2$ yang mudah bereaksi dengan larutan sulfat tidak bereaksi dengan sulfat namun bereaksi lagi dengan bahan *pozzolan (silica aktif)* membentuk kekuatan baru lagi berupa *kalsium silikat hidrat (C-S-H)*.

Reaksi yang terjadi [15]:



Kalsium Hidroksida + Sodium Sulfat → Gypsum + Sodium Hydroxide



Kalsium Aluminat Hidrat (CAH) + Gypsum → Ettringite

Dengan adanya bahan *pozzolan*, $Ca(OH)_2$ yang terbentuk bereaksi dengan *silica* aktif, sehingga $Ca(OH)_2$ akan berkurang dan dapat menghindari terjadinya reaksi $Ca(OH)_2$ dengan larutan sulfat.

Proses hidrasi semen, menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat (C-S-H) yang bersifat sebagai bahan perekat, dan kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) yang angka kelarutannya tinggi. Jika terkena asam, $Ca(OH)_2$ akan bereaksi menghasilkan gypsum. Gypsum akan bereaksi kembali dengan Kalsium Aluminat Hidrat (CAH) yang akan menghasilkan ettringite. Ettringite ini menyebabkan pengembangan volume hingga menimbulkan keretakan semen [16].

Pada gambar 8 diperoleh hasil pengujian kuat tekan pada pengujian 7 hari masing-masing sebesar 262,9; 252,45; 209,45; 190,8; 118,45; 111,65 kg/cm². Sedangkan pada pengujian 28 hari masing-masing sebesar 350,9; 341,95; 327,4; 299; 170,35; 160,05 kg/cm². Menurut Standart SNI semen PPC jenis IP-K, kuat tekan yang dihasilkan minimal 165kg/cm² untuk pengujian 7 hari dan minimal 205 kg/cm² untuk pengujian 28 hari. Dari data tersebut baik hasil kuat tekan pengujian 7 hari maupun 28 hari, variabel B sampai D (*silica fume* 7,5% sampai 22,5%) sudah sesuai dengan standart SNI semen

PPC jenis IP-K. Namun pada variabel E dan F kuat tekan yang dihasilkan dibawah standart SNI. Hal ini menunjukkan % penambahan *silica fume* pada variabel B sampai D masih layak digunakan untuk mengganti *clincer* dalam semen.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, maka diambil beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Hasil percobaan menunjukkan terjadinya penurunan nilai kuat tekan sampel pada umur 7 dan 28 hari jika dibandingkan dengan blanko. Hal ini disebabkan lambatnya reaksi *pozzolan* (*silica fume*). Namun proses peningkatan kuat tekannya akan terus berlanjut hingga setelah umur 360 hari.
2. Sampel durable cement yang memenuhi Standart Nasional Indonesia (SNI 15-0302-2004) semen PPC tipe IP-K yaitu sampel dengan penambahan *silica fume* antara 7,5% sampai 22,5%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Bagus M dan M. R. Rasyad.. Durabilitas Beton di Lingkungan Sangat Korosif dengan Menggunakan Semen Tipe I, Tipe V Dan Nitocote En 901 Jurusan Teknik Sipil. Tugas Akhir. Politeknik Negeri Bandung, 2006
- [2] P. K Mehta, Influence of pozzolanic admixtures on the transition zone in concrete. In International Seminar on Durability of Concrete. Aspects of admixtures and industrial by-products, Sweden, 1986.
- [3] Z. K. Aprieli dan S. R. Karolina, Pengaruh Penambahan Silica Fume Dan Superplasticizer Terhadap Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Dengan Metode Aci (American Concrete Institute). *Jurnal Universitas Sumatra Utara*.

- [4] Z. Matondang, Pengujian Homogenitas Varians Data, 1992.
- [5] A. Ilham, Pengaruh Sifat-Sifat Fisik dan Kimia Bahan Pozolan Pada Beton Kinerja Tinggi, Universitas Islam Indonesia: Yogyakarta, 2005
- [6] R. D Susanti, Teknologi Bahan Konstruksi. Institut Teknologi Medan: Sumatera Utara, 2011.
- [7] K. Tjokrodinuljo, Teknologi Beton, Nafiri: Yogyakarta, 1996.
- [8] S. Sebayang, Tinjauan Sifat-Sifat Mekanik Beton Alir Mutu Tinggi dengan Silika Fume Sebagai Bahan Tambahan, Universitas Lampung: Bandar Lampung, 2011.
- [9] Standart Nasional Indonesia (SNI) 15-0302-2004, *Semen Portland Pozzolan*.
- [10] Annual Book of ASTM Standards. Vol. 04.02. American Society for Testing and materials, Philadelphia: USA.
- [11] Standart Nasional Indonesia (SNI) 15-2049-2004, *Semen Portland*.
- [12] G. Refnita, Pengaruh Penambahan Abu Terbang (Fly Ash) Terhadap Kuat Tekan Mortar Semen Tipe PCC serta Analisis Air Laut yang Digunakan Untuk Perendaman, Skripsi, Jurusan Kimia Universitas Andalas Indonesia, 2012
- [13] S. Widodo, Modul Struktur Beton I. Universitas Negeri Yogyakarta: Yogyakarta, 2002.
- [14] E.R Dustan Jr, How Does Pozzolanic Reaction Make Concrete “Green”?, In World of Coal Ash (WOCA) Conference Denver : USA, May 2011.
- [15] J. B. Hariawan, Pengaruh Perbedaan Karakteristik Type Semen Ordinary Portland Cement (OPC) dan Portland Composite Cement (PCC) Terhadap Kuat Tekan Mortar, Skripsi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Gunadarma, 2012.
- [16] U. Hutapea, M. Olivia dan I. R. Sitompul. Ketahanan Mortar Di Lingkungan Asam Dengan Berbagai Tipe Semen. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains Universitas Riau*, vol. 1, no. 2, hal 1-14, 2014.