

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Supplementary Cementitious Materials (SCMs)**

SCMs merupakan material inorganik yang berkontribusi terhadap karakteristik dari campuran semen dalam bentuk aktivitas hidrasi dan pozzolanik. Material inorganik dikatakan memiliki aktivitas hidrasi apabila mampu meningkatkan kekuatan dari semen melalui reaksi kimia antara air dalam bentuk hidrat dan dikatakan memiliki aktivitas pozzolanik apabila mampu bereaksi dengan CH dengan adanya air membentuk senyawa pengikat (ASTM C311-07, 2007). Reaksi hidrasi bahan semen dengan air akan menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H), CH dan juga hidrat lainnya seperti alumina hidrat (C-A-H). SCMs dibagi menjadi 2 yaitu (Goncalves, 2015:29).

##### **1. Pozzolan atau material pozzolanik**

Merupakan bahan yang mengandung senyawa silika atau alumina yang akan bereaksi dengan air dan CH untuk membentuk C-S-H atau C-A-S-H. CH yang digunakan dalam reaksi ini merupakan produk dari hasil hidrasi semen. Pozzolan dapat berasal dari alam (pozzolan alam) atau buatan seperti produk samping dari industri (abu terbang dan *silica fume*)

##### **2. Binder laten**

Merupakan binder hasil reaksi antara C-A-S yang akan mengeras secara spontan melalui reaksi lambat dengan air. Oleh karena itu, proses pengerasan ini dapat dipercepat secara signifikan dengan adanya aktivator alkali. Senyawa ini akan memutuskan ikatan kimia dalam senyawa amorf dan mendorong pelarutan ion serta pembentukan C-A-S-H. Contoh bahan ini adalah terak tungku.

Penggantian sebagian semen dengan SCMs dapat memberikan beberapa keuntungan, diantaranya adalah (Goncalves, 2015,:29-30) :

##### **1. Lingkungan**

Adanya SCMs dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> yang bersumber dari proses pembakaran bahan baku semen di rotary kilen dimana pada tahun 2015, kapasitas produksi semen di Indonesia mencapai 65 juta ton dengan emisi CO<sub>2</sub> sekitar 58 juta ton dan kebutuhan tersebut meningkat ditahun berikutnya (Kementerian ESDM,2008).

SCMs juga dapat mengurangi konsumsi bahan bakar karena proses pembakaran tersebut memerlukan energi dengan suhu mencapai 1450°C. Selain emisi gas, proses penambangan tanah liat sebagai bahan baku semen akan menurunkan kualitas tanah.

## 2. Ekonomi

Adanya SCMs dapat mengurangi biaya pembuatan semen. Selain itu, penggunaan produk samping dari proses industri seperti abu terbang sebagai SCMs juga dapat memberikan nilai jual dari limbah tersebut.

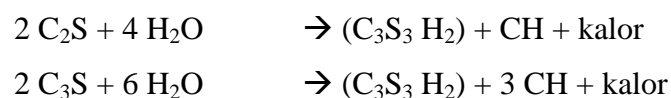
## 3. Teknologi

Adanya SCMs memberikan perbaikan sifat mekanik akibat penambahan pembentukan C-S-H atau C-A-S-H yang berkontribusi pada pengerasan matriks pasta semen, menurunkan panas hidrasi semen karena reaksi hidrasi SCMs menghasilkan panas yang lebih rendah dari reaksi hidrasi semen, dan meningkatkan daya tahan karena dapat memperbaiki porositas dan menurunkan permeabilitas serta mengurangi serangan sulfat dan klorin yang menyebabkan korosi.

### 2.2 Pozzolan

Pozzolan didefinisikan oleh standar ASTM C125 sebagai material yang mengandung silika dan alumina yang memiliki sedikit atau bahkan tidak sama sekali sifat semen, namun apabila pozzolan dalam bentuk butiran halus dengan adanya kelembapan dapat bereaksi secara kimia dengan CH pada suhu normal untuk membentuk senyawa yang bersifat semen (Cocina, 2006).

CH yang bereaksi dengan pozzolan berasal dari reaksi hidrasi semen  $C_3S$  dan  $C_2S$  yang akan menghasilkan produk utama yaitu C-S-H ( $C_3S_3H_2$ ). Berikut ini adalah reaksi hidrasi semen yang terjadi (Febrianto, 2011).



C-S-H yang dihasilkan biasanya disebut *tobermorite*, berbentuk gel yang dapat mengkristal serta bertanggungjawab terhadap kekuatan semen, sedangkan CH tidak bertanggungjawab terhadap kekuatan semen, justru dalam jangka panjang komponen ini akan melemahkan semen. Komposisi CH yang tersisa dalam semen berkisar 20% dari berat semen. Kondisi terburuk yang dimungkinkan adalah terjadi pemisahan struktur yang disebabkan oleh lepasnya CH dari semen. Dalam penerapannya pada beton sangatlah merugikan sehingga untuk mengatasinya diperlukan penambahan mineral silika untuk mengikat CH tersebut seperti pozzolan. Dengan adanya penambahan pozzolan pada

kondisi lembab, CH akan diikat oleh pozzolan membentuk kalsium-silikat-hidrat baru yang akan meningkatkan kekuatan dari beton, reaksi ini disebut **reaksi pozzolanik** (Febrianto, 2011). Berikut ini adalah reaksi tersebut



Reaksi pozzolanik ditentukan oleh 2 parameter utama yaitu :

- 1) Konsumsi CH maksimum
- 2) Laju reaksi

Kedua parameter tersebut bergantung pada sifat bahan pozzolaniknya, artinya komposisi kimia dan mineral logam didalamnya serta pada ukuran partikelnya (Tashima dkk., 2014)

Bahan pozzolan dapat diperoleh dari berbagai sumber yaitu dari mineral alami seperti zeolit dan kaolin atau produk samping dari industri seperti abu terbang, abu ampas tebu dan abu sekam padi. Pada tabel 2.1 berikut menjelaskan komposisi kimia beberapa bahan pozzolan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Uzal (2010).

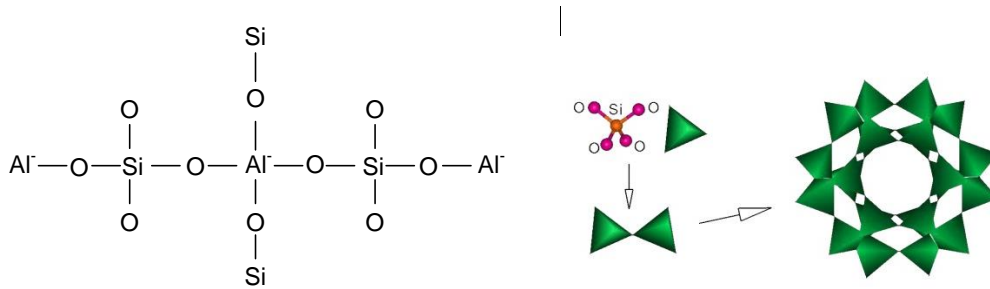
Tabel 2.1 Komposisi Kimia Bahan Pozzolan

Analisa Oksida (%)	Zeolit ( <i>Clinoptilolite</i> )	<i>Silica fume</i>	Abu Terbang	Pozzolan alam non zeolit
SiO <sub>2</sub>	69,32	95,2	57,86	61,56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,35	0,55	22,67	11,46
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,28	0,17	6,88	2,96
CaO	1,72	0,21	4,08	2,90
MgO	0,82	0,55	4,32	1,42
Na <sub>2</sub> O	0,95	0,17	0,77	3,76
K <sub>2</sub> O	3,96	1,03	1,82	2,39
<i>Loss of Ignition</i>	8,90	1,11	2,76	4,83
Total	98,30	98,99	101,16	91,28

Sumber: Uzal (2010)

### 2.3 Zeolit

Zeolit adalah kristalin alumina silikat dengan struktur kerangka tiga dimensi berdasarkan unit pengulangan tetrahedral silikon (IV) oksida (SiO<sub>4</sub>) dan aluminium-oksigen (AlO<sub>4</sub>) seperti pada gambar 2.1, serta mengandung SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reaktif dalam jumlah besar (Lestari, 2010). Beberapa spesimen zeolit berwarna putih, kebiruan, kemerahan dan coklat karena hadirnya oksida besi atau logam lainnya. Densitas zeolit antara 2,0 - 2,3 g/cm<sup>3</sup>, dengan bentuk halus dan lunak. Struktur zeolit dapat dibedakan dalam tiga komponen yaitu rangka alumina-silikat, ruang kosong saling berhubungan yang berisi kation logam, dan molekul air (Saputra, 2006).



Gambar 2.1 Struktur Zeolit  
Sumber: Saputra (2006)

### 2.3.1 Zeolit alam

Zeolit alam adalah salah satu material yang banyak terdapat pada daerah pegunungan berapi yang berasal dari transformasi abu vulkanik. Para ahli geokimia dan mineralogi memperkirakan bahwa zeolit merupakan produk gunung berapi yang membeku menjadi batuan vulkanik, batuan sedimen dan batuan metamorfosa yang selanjutnya mengalami proses pelapukan karena pengaruh panas dan dingin sehingga terbentuk mineral-mineral zeolit (Lestari, 2010). Pada tabel 2.2 menunjukkan komposisi dan formula beberapa zeolit alam.

Zeolit alam banyak tersedia di alam sehingga harganya lebih murah dibandingkan dengan zeolit sintetis namun memiliki beberapa kekurangan antara lain distribusinya tidak merata, kristalinitas yang kurang baik, porositas dan distribusi ukuran pori yang tidak merata serta mengandung banyak pengotor (Goenadi, 2004). Di Indonesia daerah-daerah yang telah diketahui banyak mempunyai sumber daya endapan zeolit adalah Jawa Barat, Jawa Timur, dan Lampung (Kusdarto, 2008).

Tabel 2.2 Komposisi dan Formula Zeolit Alam

Nama	Kation dominan	Rumus Kimia	Massa Jenis
Faujasit	Na, Ca	$\text{NaAlSi}_{2,4}\text{O}_{7,2}\cdot 4,6\text{H}_2\text{O}$	1,92
Klinoptilolit	K, Na, Ca	$\text{NaAlSi}_{4,2-5}\text{O}_{10,4-12}\cdot 3,5-4\text{H}_2\text{O}$	2,13-2,17
Mordenit	Na, Ca	$\text{NaAlSi}_{4,5-5}\text{O}_{11-12}\cdot 3,2-3,5\text{H}_2\text{O}$	2,12
Erionit	Na, K, Ca	$\text{NaAlSi}_{3-3,5}\text{O}_{8-9}\cdot 3-3,4\text{H}_2\text{O}$	2,07
Kabasit	Na, Ca	$\text{NaAlSi}_{1,7-3}\text{O}_{5,4-8}\cdot 2,7-4\text{H}_2\text{O}$	2,08
Filipsit	K, Na, Ca	$\text{NaAlSi}_{1,3-3,4}\text{O}_{4,6-8,8}\cdot 1,7-3,3\text{H}_2\text{O}$	2,0-2,3
Gonardit	Na, Ca	$\text{NaAlSi}_{1,1-1,4}\text{O}_{4,4-4,8}\cdot 1,2-1,3\text{H}_2\text{O}$	2,27
Analsim	Na	$\text{NaAlSi}_{2-2,8}\text{O}_{6-7,6}\cdot 1-1,3\text{H}_2\text{O}$	2,26
Natrolit	Na	$\text{NaAlSi}_{1,5}\text{O}_5\cdot \text{H}_2\text{O}$	2,24

Sumber: Saputra (2006)

Berdasarkan catatan Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Kabupaten Malang (2010), ditemukan mineral zeolit yang melimpah dengan luas wilayah 12,7 ha yang terletak di desa Kedung Banteng, Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Kabupaten Malang.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Setiadi (2007) mengenai preparasi dan karakterisasi zeolit alam malang termasuk jenis mordenit. Kandungan Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan Silika ( $\text{SiO}_2$ ) yang merupakan komponen utama pembentuk rangka (*framework*) dari zeolit alam yaitu sebesar 10,2816 % (wt) untuk alumina dan 53,2322 % (wt) untuk silika. Sehingga perbandingan rasio Si/Al yang dimiliki oleh zeolit alam ini adalah sebesar 5,17, yang menunjukkan kerapatan atom Al pada struktur kerangka kristal zeolit cukup tinggi (Setiadi, 2007).

### 2.3.2 Sifat-sifat zeolit

Zeolit alam memiliki begitu banyak kegunaan diantaranya (Said,2008) :

1. Sifat dehidrasi dari zeolit akan berpengaruh terhadap sifat adsorpsinya. Zeolit dapat melepaskan molekul air dari dalam rongga permukaan yang menyebabkan medan listrik meluas ke dalam rongga utama dan akan berinteraksi dengan molekul yang akan diadsorpsi.
2. Adsorpsi. Dalam keadaan normal, ruang hampa dalam kristal zeolit terisi oleh molekul air bebas yang berada di sekitar kation. Bila mineral zeolit dipanaskan pada suhu  $300^\circ\text{C}$  hingga  $400^\circ\text{C}$  maka air tersebut akan keluar sehingga zeolit dapat berfungsi sebagai penyerap gas atau cairan. Selain mampu menyerap gas atau cairan, zeolit juga mampu memisahkan molekul dan kepolarannya, meskipun ada 2 molekul atau lebih yang dapat melintas tetapi hanya satu saja yang dapat lolos. Hal ini dikarenakan faktor selektivitas dari mineral zeolit tersebut yang tidak ditemukan pada adsorben padat lainnya.
3. Penukar Ion. Ion-ion pada rongga atau kerangka berguna untuk menjaga kenetralan zeolit. Ion-ion ini dapat bergerak bebas sehingga pertukaran ion dapat terjadi, tergantung dari ukuran dan muatan maupun jenis zeolitnya.
4. Katalis. Ciri paling khusus dari zeolit yang secara praktis akan menentukan sifat khusus mineral ini adalah adanya ruang kosong yang akan membentuk saluran di dalam strukturnya. Bila zeolit digunakan pada proses penyerapan atau katalis maka akan terjadi difusi molekul ke dalam ruang bebas diantara kristal. Zeolit merupakan katalisator yang baik karena mempunyai pori-pori yang besar dengan permukaan yang maksimum.
5. Penyaring atau Pemisah. Meskipun banyak media berpori yang dapat digunakan sebagai penyaring atau pemisah campuran uap atau cairan, tetapi distribusi diameter dari pori-pori media tersebut tidak cukup efektif seperti halnya penyaring molekular

zeolit yang mampu memisahkan campuran berdasarkan perbedaan ukuran, bentuk dan polaritas dari molekul yang disaring. Zeolit dapat memisahkan molekul gas atau zat lain dari suatu campuran tertentu karena mempunyai ruang hampa yang cukup besar dengan garis tengah yang bermacam-macam tergantung dari jenis zeolit.

6. Pozzolan. Zeolit yang telah dijelaskan sebelumnya memiliki kemampuan yang baik untuk bereaksi dengan CH pada suhu ruang. Selain itu zeolit mengandung Si dan Al yang dominan, sehingga dapat digunakan sebagai bahan pozzolan.

## 2.4 Performa Zeolit sebagai SCMs

### 2.4.1 Kapasitas pozzolanik dari zeolit

Reaksi semen dan air menghasilkan 2 produk utama yaitu C-S-H dan CH. C-S-H merupakan produk yang lebih disukai karena mengandung kekuatan dari bahan padat yang terhidrasi. Salah satu cara zeolit berinteraksi dalam sistem semen adalah melalui reaksi pozzolanik yang menghasilkan C-S-H. Tahapan reaksi pozzolanik adalah sebagai berikut (Burris, 2014):

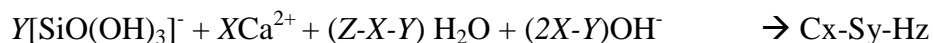
1. Hidrolisis CH sehingga meningkatkan pH sistem



2. Kondisi pH tinggi dapat melarutkan dan depolimerisasi kandungan silika dan alumina zeolit



3.  $\text{Ca}^{2+}$  dan zeolit akan bertemu dan melakukan reformasi membentuk C-S-H atau  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$



Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, zeolit mulai mengalami reaksi pozzolanik setelah 2-3 hari dan berlanjut sampai satu tahun, seperti yang ditunjukkan oleh Lilkov dkk. (2011b), yang menemukan bahwa dengan penggantian 10%, tidak ada kalsium hidroksida yang tertinggal dalam sampel setelah 365 hari. Dibandingkan dengan campuran pasta yang mengandung abu terbang, campuran semen zeolit ditemukan memiliki tingkat reaksi yang lebih tinggi setiap waktu setelah 3 hari pencampuran. Distribusi ukuran partikel, luas permukaan spesifik eksternal, dan struktur kristal zeolit mempengaruhi laju reaksi pozzolanik zeolit diawal reaksi, sementara rasio Si/Al menentukan umur reaksi

pozzolanik terjadi karena ketersediaan silika bebas mendorong reaksi pozzolanik (Burris, 2014).

Secara umum, akibat reaksi pozzolanik, penggunaan SCMs menghasilkan jumlah C-S-H yang lebih banyak karena CH akan bereaksi menjadi C-S-H, dan menurunkan porositas karena produk reaksi pozzolanik mengisi pori-pori campuran. Sehingga penggunaan SCMs sering diterjemahkan menjadi bahan yang dapat meningkatkan kekuatan tekan dan daya tahan yang lebih baik di lingkungan yang agresif, seperti yang mengandung sulfat atau klorida (Burris, 2014).

#### **2.4.2 Kuat Tekan**

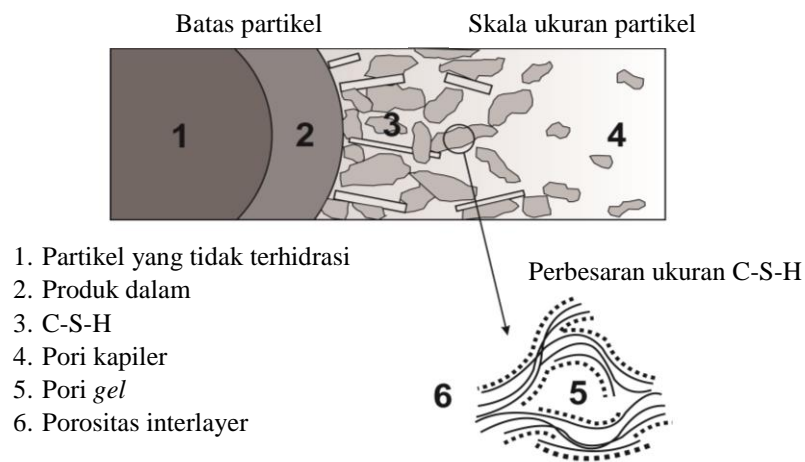
Pengaruh penggantian semen dengan zeolit pada kuat tekan banyak diperdebatkan oleh para peneliti. Ahmadi dan Shekarchi (2010) menguji tingkat penggantian dari 5-20% berat semen dengan zeolit dan melihat peningkatan kekuatan beton campuran terhadap beton kontrol, dan didapatkan hasil bahwa persentase substitusi semen optimal berdasarkan kuat tekan pada 90 hari adalah 15% zeolit. Namun, riset lain menjelaskan adanya penurunan kuat tekan seiring dengan peningkatan persentase zeolit yang disubstitusi. Berdasarkan penelitian Lilkov dkk. (2011c) menunjukkan bahwa mortar campuran semen dan zeolit mengalami penurunan kuat tekan pada 28 hari, dan efek penurunan kuat tekan berkurang setelah 180 hari. Zeolit berkontribusi secara efektif terhadap kuat tekan jika rasio air/semen rendah ( $w/cm$ ) dibandingkan dengan campuran  $w/cm$  yang lebih tinggi. Ukuran partikel juga memiliki pengaruh terhadap kuat tekan, yaitu semakin kecil ukuran partikel zeolit maka akan meningkatkan kuat tekan pada mortar (Burris, 2014).

#### **2.4.3 Porositas**

Porositas dari struktur pasta semen tersusun dari pori kapiler (200-700 nm) yang merupakan ruang pori antar agregat yang terisi oleh air dan pori *gel* (3-30 nm) yang merupakan rongga dalam pasta semen. Pori-pori kapiler merupakan pori dengan ukuran terbesar yang memainkan peran yang lebih besar dalam sifat transfer beton sehingga mempengaruhi kekuatan beton. Kehadiran agregat dalam beton menciptakan zona transisi antar muka yang memiliki porositas dengan ukuran yang sebanding dengan pori-pori kapiler. Pada Tabel 2.3 dan Gambar 2.2 menjelaskan klasifikasi pori pada beton dan skema komponen penyusun beton. Pada gambar 2.2 partikel yang tidak terhidrasi akan menjadi produk *inert* sebagai nukleus tempat menempelnya produk hidrasi. Selain itu pori interlayer terdiri dari volume air yang tertinggal pada antar permukaan lapisan dari C-S-H (Maekawa, 2005:36). Urutan besarnya porositas total pada 28 hari adalah sekitar 15%

untuk beton biasa, 10-12% untuk beton dengan kekuatan tinggi, dan 7-9% untuk beton dengan kekuatan sangat tinggi (Torgal dkk., 2013).

Kehadiran SCMs menurunkan porositas beton berbasis semen dan menyempurnakan distribusi ukuran pori jika dibandingkan beton tanpa SCMs. Porositas total beton berbasis semen dengan SCMs dapat dipengaruhi oleh reaksi kimia (pozzolanik) dan pengaruh fisik (kepadatan beton) yang dipengaruhi oleh penggunaan ukuran partikel. Dimana, porositas menurun seiring dengan penggunaan partikel dengan ukuran yang sangat kecil (Torgal dkk., 2013).



Gambar 2.2 Skema Komponen Penyusun Beton  
Sumber: Maekawa (2005:36)

Pengaruh spesifik adanya SCMs pada struktur pori pasta semen bila dibandingkan dengan pasta semen tanpa SCMs adalah sebagai berikut (Torgal dkk., 2013):

1. Pada jangka pendek, SCMs menyebabkan peningkatan porositas dan ukuran pori-pori pasta karena kualitas hidrat yang dihasilkan SCMs lebih rendah. *Gel* C-S-H yang terbentuk oleh SCMs memiliki rasio Ca/Si yang lebih rendah.
2. Pada jangka panjang, reaksi pozzolanik akan membentuk produk hidrat yang dapat menyempurnakan porositas terbuka karena menurunkan ukuran pori kapiler dan diameter rata-rata pori.



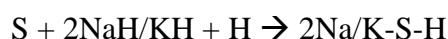
Tabel 2.3 Klasifikasi Pori Pada Beton

Jenis pori	Deskripsi	Ukuran	Air	Sifat
Pori Kapiler	Besar	10 $\mu\text{m}$ – 50 $\mu\text{m}$	Mudah menguap	Permeabilitas dan kekuatan
	Kecil	50 $\mu\text{m}$ – 10 nm	Mudah menguap	Permeabilitas, kekuatan dan penyusutan (tingginya kelembapan)
Pori <i>gel</i>	Kecil	10 – 2,5 nm	Mudah menguap	Menyebabkan penyusutan (RH mencapai 50%)
	Mikropori	2,5 – 0,5 nm	Tidak mudah menguap dan merupakan interaksi intermolekular	Menyebabkan penyusutan (RH mencapai 35-11%)
Celah <i>interlayer</i>	Struktural	< 0,5 nm	Tidak mudah menguap dan merupakan ikatan ionik/kovalen	Menyebabkan penyusutan (RH mencapai <11%)
Lainnya	ITZ ( <i>Interfacial Transition Zone</i> )	20 – 50 $\mu\text{m}$	<i>Bulk water</i>	Permeabilitas dan kekuatan
	<i>Microcrack</i>	50 - >200 $\mu\text{m}$	<i>Bulk water</i>	Permeabilitas dan kekuatan

Sumber: Mercedes (2008: 111)

#### 2.4.4 Reaksi silika-alkali

Reaksi silika-alkali merupakan reaksi yang merugikan dalam beton, reaksi ini terjadi antara kandungan alkali pada semen dengan agregat yang berpotensi memiliki silika reaktif. Ion OH<sup>-</sup> hasil hidrasi semen akan memutus ikatan Si-O-Si pada agregat untuk membentuk silika anion (SiO<sup>-</sup>). Muatan negatif dari anion silika ini akan dinetralkan oleh muatan positif dari ion alkali (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>) dengan kehadiran air dan akan menghasilkan *gel* alkali-silika-hidrat :



*Gel* inilah yang membuat tekanan internal yang menyebabkan keretakan dan mengurangi kekuatan beton. Untuk mengontrol terjadinya ASR maka perlu penggunaan semen dengan kandungan alkali yang rendah dan penggunaan agregat yang nonreaktif (Goncalves, 2015:26).

#### **2.4.5 Ketahanan Terhadap Sulfat**

Penambahan zeolit dalam semen dapat meningkatkan ketahanan terhadap serangan sulfat. Karakurt dan Topçu (2011) mengemukakan bahwa mortar dengan substitusi 30% semen dengan zeolit mengalami ekspansi 0,017% setelah 6 bulan terpapar larutan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  10, kurang dari setengah batas ekspansi 0,05% untuk semen tahan sulfat yang disyaratkan pada ASTM C1157 (2011). Selain itu, Janotka dkk. (2011) melihat hasil yang sama, mortar dengan 15% zeolit terhadap berat semen menunjukkan ekspansi kurang dari 0,5% setelah 6 bulan terpapar larutan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  5% dan ekspansi yang terjadi sangatlah kecil selama satu tahun. Peningkatan resistensi terhadap serangan sulfat pada mortar semen zeolit merupakan akibat dari struktur pori-pori mortar yang lebih halus karena penggunaan zeolit-semen serta interaksi kimia yang mengarah pada pengembangan produk hidrasi yang berbeda dan jumlah CH yang lebih rendah dalam campuran (Burris, 2014).

#### **2.4.6 Faktor daya tahan lainnya**

Penyerapan air, permeabilitas oksigen dan permeabilitas klorida akan mengalami penurunan dengan adanya zeolit sebagai SCMs. Zeolit alam juga meningkatkan resistivitas listrik beton, yang menandakan penurunan konsentrasi ion pori larutan dan distribusi pori yang lebih halus. Hasil akhir reaksi pozzolanik terhadap hidrasi mortar menunjukkan bahwa volume pori spesifik dari mortar semen zeolit lebih besar pada 28 hari dari pada mortar semen, namun volume pori-porinya relatif menurun antara 28- 180 hari terhadap mortar semen. Zeolit juga dapat mengurangi kedalaman karbonasi dimana kedalaman karbonasi minimum dicapai dengan penambahan 30% zeolit sebagai SCMs (Burris, 2014).

#### **2.4.7 Panas Hidrasi**

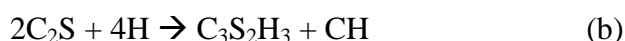
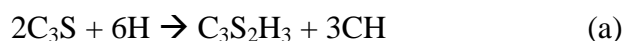
Pemahaman tentang bagaimana SCMs mempengaruhi panas kumulatif hidrasi yang dilepaskan oleh campuran semen SCMs dapat meningkatkan pemahaman tentang reaksi yang terjadi dalam campuran, membantu mengukur tingkat hidrasi tiap waktu, dan menentukan apakah campuran tersebut dapat digunakan untuk struktur berskala besar, seperti bendungan. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggantian semen dengan zeolit menghasilkan panas hidrasi yang lebih rendah. Hal ini terjadi karena pada beberapa jam pertama zeolit akan menyerap air dan memperlambat pelepasan butir semen. Penggantian semen dengan zeolit dapat menghasilkan kemajuan percepatan hidrasi awal semen (Burris, 2014)

### 2.4.8 Kebutuhan Air

Kebutuhan air tidak terkait langsung dengan reaktivitas pozzolanik dari bahan zeolitik, namun merupakan salah satu tantangan terbesar untuk memanfaatkan zeolit sebagai SCMs. Campuran semen dan zeolit memiliki kebutuhan air yang meningkat terhadap pasta yang rapat, terutama karena luas permukaan material dan struktur berpori yang tinggi. Kebutuhan air pada pasta meningkat sebanding dengan dosis zeolit. Namun, tidak ada masalah yang dihadapi saat menggunakan *superplasticizers* untuk mengatasi kebutuhan air yang lebih tinggi dari campuran semen zeolit (Burris, 2014).

### 2.5 Reaksi Hidrasi dan Pozzolanik

Ketika air ditambahkan pada campuran kering semen dan SCMs maka akan menginisiasi reaksi hidrasi semen dan pembentukan produk hidrasi yaitu C-S-H dan C-A-H *gel*, fasa AFm, Aft dan CH. (Papadakis, 1992) mengusulkan reaksi kimia senyawa mineral semen *Portland* dapat dijelaskan sebagai berikut:

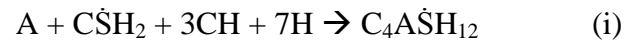
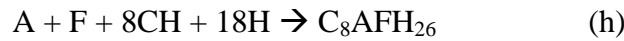


Reaksi  $C_3S$  (a) dan  $C_2S$  (b) dengan air akan menghasilkan C-S-H amorf yang merupakan pengikat utama agregat halus dan kasar dalam beton. Hidrasi  $C_3S$  lebih cepat dibandingkan dengan  $C_2S$  pada kondisi suhu  $20^\circ C$ , sekitar setengah dari  $C_3S$  yang ada dalam semen umumnya akan terhidrasi selama 3 hari dan 80% selama 28 hari, sedangkan  $C_2S$  tidak bereaksi sampai waktu kurang lebih 14 hari. Pada reaksi semen, jika tidak ada kalsium sulfat (*gypsum*) maka  $C_3A$  akan bereaksi secara cepat seperti pada reaksi (e). Reaksi tersebut berlangsung sangat cepat dan menghasilkan panas reaksi yang tinggi. Jika terdapat *gypsum* ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) dalam campuran semen maka  $C_3A$  akan diawal reaksi hidrasi akan dikontrol dengan pembentukan lapisan pelindung yaitu *ettringite* yang terdapat pada permukaan (reaksi c) (Newman, 2003:15-17).

Reaksi pozzolanik dari SCMs merupakan reaksi kompleks yang dimulai dengan adanya CH atau ion  $Ca^{2+}$  dan air. Dekomposisi SCMs dimulai pada permukaan butiran akibat adanya serangan ion hidroksil (OH<sup>-</sup>). Pelepasan atau pelarutan dari SCMs terutama silika akan mempengaruhi saturasi pori larutan pada waktu yang sama. Akibatnya nukleasi heterogen dimulai dan diikuti dengan munculnya produk C-S-H pada permukaan butiran

SCMs. Pembentukan lapisan C-S-H yang mengelilingi permukaan SCMs akan mempengaruhi laju reaksi. Lapisan tersebut akan mengalami pertumbuhan dan densifikasi sehingga akan mengganggu difusi ion  $\text{OH}^-$  menuju fasa yang tidak bereaksi dan menyebabkan penurunan laju reaksi (Radeka, 2016).

Produk hidrasi dari binder yang terdiri dari semen dan SCMs secara umum mengandung C-A-S-H, AFm dan *ettringite* seperti reaksi di bawah ini (Papadakis, 1992).



Fasa C-S-H pada beton dengan penambahan SCMs berbeda cukup signifikan dari pada beton yang terdiri dari semen saja. Pada beton dengan campuran SCMs rasio dari C/S pada produk hidrasi lebih rendah akibat penurunan jumlah semen dan ketersediaan ion Si dan Al yang besar hasil pelarutan SCMs sehingga mengakibatkan C-S-H hasil hidrasi pozzolan lebih berpori dan bersifat *gel* yang mengandung air. Pembentukan C-A-S-H akan menyebabkan peningkatan pengambilan alkali karena bermuatan negatif, karena itu pH larutan dalam pori akan menurun (Radeka, 2016).

Perbedaan utama antara reaksi hidrasi OPC (reaksi (a) sampai (e)) dan reaksi pozzolanik (reaksi (f) sampai (j)) adalah oksida dasar pada OPC yaitu  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bereaksi dalam bentuk senyawa  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  dan  $\text{CAF}$  yang terbentuk di klinker, sedangkan pada reaksi pozzolanik hanya oksida pozzolan amorf yang akan bereaksi dengan CH. Fraksi oksida pada pozzolan yang tidak amorf (*crystalline*) tidak berpartisipasi dalam aktivitas pozzolanik walaupun pada suhu ruang. Perbedaan lainnya adalah saat proses pengerasan reaksi utama pozzolan (reaksi (g) sampai (j)) membutuhkan CH, sedangkan pada reaksi hidrasi OPC menghasilkan CH (Papadakis, 1992).

Ketika zeolit digunakan sebagai SCMs maka reaksi pozzolanik akan semakin meningkat karena zeolit memiliki kemampuan mengabsorb sejumlah air, selain itu kation yang mudah ditukarkan (*exchangeable*) dapat mempengaruhi reaksi pozzolanik zeolit dan rasio Ca/Si pada C-S-H. Zeolit dapat menyerap air dalam jumlah besar pada struktur porinya. Ketika struktur kerangka zeolit terdegradasi maka air akan dilepaskan dan akan berperan pada proses hidrasi saat jumlah air pada pori pasta binder menurun (Radeka, 2016). Komponen penyusun beton dan karakterisasinya dijelaskan pada tabel 2.5 dibawah ini.

Reaksi pozzolanik zeolit saat penyerangan ion hidroksil akan diikuti oleh disosiasi dari Si-OH dan Al-OH menjadi kelompok Si-O dan Al-O. Kation  $\text{Ca}^{2+}$  dari larutan jenuh CH akan terabsorb ke permukaan. Adanya serangan ion hidroksil tersebut menyebabkan degradasi ikatan Si-O-Si dan Al-O-Si yang mendasari struktur kerangka zeolit. Muatan negatif pada struktur zeolit akan menghalangi difusi ion hidroksil masuk hingga ke struktur zeolit terdalam. Proses ini tergantung pada konsentrasi Si-O dan Al-O pada permukaan yang berarti proses pelarutan tergantung pada permukaan spesifik zeolit (Radeka, 2016).

Tabel 2.3 Komponen Penyusun Beton

Komponen	Kuat tekan	Stabilitas	Daya tahan
C-S-H	Komponen utama yang bertanggung-jawab terhadap kekuatan mekanik karena interaksi van der Waals yang menentukan gaya kohesi dan adesi antar fase padat	Pada proses pengerasan pasta, komponen ini menyebabkan penyusutan dengan membentuk interaksi van der Waals tambahan (setelah perpindahan air dari mikropori pasta)	Porositas dalam komponen ini mempengaruhi difusi zat endogen dan eksogen yang dapat mempengaruhi terjadinya reaksi yang mengganggu
CH	Komponen ini mengisi pori dan berkontribusi untuk mengurangi porositas beton sehingga meningkatkan kekuatan beton Disisi lain, mikrostrukturnya membentuk celah yang menyebabkan penurunan kekuatan mekanik	Senyawa yang stabil secara dimensional yang membatasi perubahan volumetrik yang terkait dengan C-S-H	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mengurangi difusi zat endogen dan eksogen dengan mengisi celah/pori yang terbentuk antar agregat</li> <li>- Berpartisipasi dalam reaksi ASR, karbonasi dan bereaksi dengan asam</li> </ul>
Aft dan Afm	Mengisi pori-pori sehingga berkontribusi untuk mengurangi porositas dan meningkatkan kekuatan	Pembengkakan terkait dengan fase Aft berkontribusi terhadap ekspansi beton	Berpartisipasi dalam reaksi kimia yang berhubungan dengan serangan sulfat
Porositas	Sebagai faktor penentu kekuatan mekanik, kekuatan akan menurun dengan meningkatnya porositas	Khususnya pori-pori kecil dalam <i>gel</i> C-S-H berperan penting dalam penyusutan (akibat menguapnya air dalam pori <i>gel</i> )	Berpengaruh terhadap difusi zat endogen dan eksogen, sehingga mempengaruhi terjadinya reaksi yang mengganggu
Air	Porositas meningkat ketika proses pengerasan beton seiring dengan kenaikan rasio air/semen sehingga menurunkan kuat tekan	Perpindahan air dari pori akibat pengeringan khususnya air dalam pori <i>gel</i> C-S-H dapat menyebabkan penyusutan (akibat dari interaksi van der Waals yang terbentuk di <i>gel</i> )	Tingginya rasio air/semen menyebabkan tingginya porositas sehingga menyebabkan tingginya permeabilitas dan berdampak negatif terhadap daya tahan campuran

Sumber: Goncalves (2015:25)

## **2.6 Faktor yang Mempengaruhi Aktivitas Pozzolanik**

Laju reaksi pozzolanik bergantung pada beberapa faktor yaitu faktor intrinsik dan faktor ekstrinsik.

### **2.6.1 Faktor intrinsik dari aktivitas pozzolanik**

#### **2.6.1.1 Ukuran partikel**

Kecilnya ukuran partikel dan tingginya luas permukaan spesifik pozzolan meningkatkan aktivitas pozzolanik. Reaksi pozzolanik terjadi diantara permukaan partikel pozzolan. Karakteristik permukaan akan mempengaruhi aktivitas pozzolanik. Sehingga, diperlukan pozzolan dengan luas permukaan spesifik yang tinggi untuk memaksimalkan luas permukaan yang akan bereaksi dengan CH. Penelitian yang dilakukan Coutinho (1988) menjelaskan bahwa ukuran partikel yang dibutuhkan pozzolan minimal tingkat kehalusannya  $3.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ , atau bisa pada rentang antara  $6.000 \text{ cm}^2/\text{g}$  -  $10.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Penelitian Day dan Caijun (1994) menjelaskan bahwa meningkatnya tingkat kehalusan partikel pozzolan dari  $2.500 \text{ cm}^2/\text{g}$  hingga  $5.500 \text{ cm}^2/\text{g}$  meningkatkan aktivitas pozzolanik khususnya diawal reaksi. Meningkatnya tingkat kehalusan pozzolan akan meningkatkan kuat tekan dari pozzolan tersebut, namun hal tersebut meningkatkan kebutuhan air, sehingga terdapat ukuran partikel optimum untuk memaksimalkan kekuatan dari pengaplikasian pozzolan sebagai bahan pengganti semen. Kiattikomol dkk (2001) menjelaskan bahwa faktor tingkat kehalusan dari abu terbang sangatlah penting dan berpengaruh terhadap aktivitas kekuatan abu terbang sebagai pozzolan dibandingkan faktor komposisi kimia penyusunnya (Torgal, 2011).

Pada umumnya, tingkat kehalusan pozzolan merupakan faktor penting karena semakin kecil ukuran partikel artinya semakin besar luas permukaan yang akan terpapar dalam lingkungan alkali pada beton. Kehalusan biasanya dinilai dengan persentase yang ditahan pada ayakan  $45\mu\text{m}$  (saringan basah) dan berkisar antara beberapa persen sampai 35% (Sear, 2001). Permukaan spesifik yang tinggi membuat kombinasi CH menjadi lebih mudah. Namun, menurut Massazza [8], ini hanya berlaku untuk tahap awal reaksi pozzolanik sedangkan pada waktu yang lebih lama, reaksi pozzolanik lebih utama dikendalikan oleh kandungan silika dan alumina aktif (Walker, 2011).

#### **2.6.1.2 Struktur partikel**

Struktur amorf pozzolan lebih reaktif dari pada stuktur kristal, karena mobilitas dan lokasi superfisial atomnya lebih besar (Walker, 2011).

### 2.6.1.3 Komposisi kimia

Pozzolan dengan mineral-mineral kristal non-reaktif dalam jumlah yang terbatas dianggap sangat aktif, sebaliknya, pozzolan lemah mengandung mineral kristalin dalam jumlah besar (Walker, 2011).

### 2.6.1.4 Kandungan fase aktif.

Reaksi pozzolanik terbentuk karena kandungan silika dan alumina aktif dalam pozzolan. Sebuah proses dikatakan bagian dari aktivitas pozzolanik ketika ada ikatan molekul irreversibel yang terbentuk dalam proses (Walker, 2011).

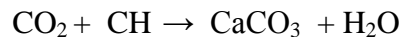
## 2.6.2 Faktor ekstrinsik dari aktivitas pozzolanik

### 2.6.2.1 Temperatur

Reaksi kimia antara CH dan bahan pozzolan dipengaruhi oleh suhu suspensi yang secara langsung mempengaruhi tingkat reaksi. Kelarutan dari silika meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Namun, kelarutan CH dalam air menurun seiring dengan meningkatnya temperatur. Berdasarkan pengaruh temperatur terhadap kelarutan 2 konstituen utama dalam reaksi pozzolanik, maka terdapat suhu optimum yang mempengaruhi aktivitas pozzolanik (Torgal, 2011).

### 2.6.2.2 Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)

CO<sub>2</sub> berpengaruh pada reaksi pozzolanik yaitu menyebabkan terbentuknya kalsit (kalsium karbonat) sebagai reaksi sekunder dari reaksi pozzolanik yang disebut dengan reaksi karbonasi. Berdasarkan penelitian Eitel Mayers menjelaskan bahwa selain menyebabkan terbentuknya kalsium karbonat, CO<sub>2</sub> mampu mendekomposisi produk reaksi silika atau alumina. Reaksi antara CH hasil hidrasi semen dengan CO<sub>2</sub> yaitu (Goncalves, 2015:27)



Faktor yang mempengaruhi adanya reaksi karbonasi antara lain RH (*Relative humidity*), konsentrasi CO<sub>2</sub> dan perbandingan air/semén dalam campuran. Karbonasi dapat mengakibatkan 2 hal yang berbeda yaitu dampak positif dan negative. Dampak positif yaitu karbonasi yang terjadi pada beton yang padat dan rapat akan menurunkan total porositas, sehingga akan meningkatkan mikrostruktur dari semen, daya tahan dan kekuatan dari semen dengan menurunkan permeabilitasnya. Dampak negatifnya yaitu reaksi ini akan menurunkan daya tahan dari beton karena reaksi karbonasi ini akan menurunkan pH alkali



sehingga akan meningkatkan resiko korosi dan merusak permukaan semen (Ramezaniapour, 2014:28-29)

## **2.7 Metode Karakterisasi Aktivitas Pozzolanik**

Metode dan prosedur standar untuk mengevaluasi spesifikasi dari pozzolan dibagi menjadi 2 kategori, yaitu

### **2.7.1 Metode Langsung**

Mengukur keberadaan CH dan pengurangannya selama proses reaksi pozzolanik berlangsung ataupun mengukur produk hidrasi yang terbentuk dengan menggunakan metode analisis seperti difraksi sinar-X (XRD), analisis termo-gravimetrik (TGA) atau titrasi kimia klasik. Kecepatan konsumsi CH sesuai dengan laju awal reaksi pozzolanik. Produksi kalsit bergantung pada kehadiran CH, diasumsikan bahwa, jika kalsit terbentuk, kandungan CH masih tersisa dan reaksi pozzolanik masih aktif (Donatello dkk., 2010). Berikut ini adalah beberapa contoh metode langsung untuk karakterisasi aktivitas pozzolanik

#### **2.7.1.1 Analisis *Thermo-gravimetric***

Kapasitas ikatan kapur yang terjadi selama aktivitas pozzolanik berlangsung dapat diukur menggunakan analisis termogravimetri. Metode ini berdasarkan dekomposisi termal kristal CH pada rentang temperatur 400-500°C menjadi kalsium oksida dan air yang teruapkan. Pengurangan berat yang dihasilkan akibat air yang teruapkan akan sangat rendah untuk pozzolan yang baik dan akan tinggi untuk pozzolan yang lemah (Torgal dkk., 2013: 125).

#### **2.7.1.2 Analisis mineral**

Komponen mineral yang terkandung dalam pozzolan secara semi kuantitatif dapat diidentifikasi dengan metode XRD. Kandungan silika amorf yang memiliki peran utama dalam aktivitas pozzolanik dapat ditentukan melalui identifikasi jumlah mineral kristal yang terkandung dalam pozzolan. Metode analisis dengan XRD ini berhubungan dengan analisis IR, karena kandungan residu yang tidak terlarut menunjukkan jumlah mineral terlarut dan tidak terlarut yang terdeteksi pada XRD (Torgal dkk., 2013: 126).

Penentuan mineral amorf dan kristal pada pozzolan alam sangatlah penting untuk evaluasi kandungan oksida. Berdasarkan penelitian sebelumnya telah mengungkapkan bahwa konstituen amorf adalah fase alkali aktif yang sangat signifikan. Tidak ada batasan umum terhadap jumlah mineral amorf dalam pozzolan alami yang dipertimbangkan untuk

penggantian semen. Namun, penelitian yang pernah ada menunjukkan bahwa pozzolan alam dengan kandungan mineral amorf kurang dari 15% tidak akan memiliki kinerja yang baik sebagai pengganti semen. Metode lain yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi kandungan mineral kristal dan amorf dalam pozzolan adalah metode petrografi menggunakan mikroskop-petrografi (Torgal dkk., 2013: 126).

### **2.7.1.3 Uji frattini**

Pada metode ini, sampel yang akan diuji berupa campuran semen, pozzolan alam dan air destilat yang disimpan dalam botol tertutup dan di oven pada suhu 40°C selama 8 hari. Lamanya penyimpanan pada oven tergantung pada pozzolan yang digunakan. Setelah 8 hari penyimpanan selesai, sampel di vakum filter menggunakan kertas saring dengan ukuran pori 2,7 µm dan didinginkan pada suhu ambien. Filtrat yang dihasilkan dianalisa kandungan ion OH<sup>-</sup> dengan titrasi menggunakan HCl dengan *methyl orange* sebagai indikator dan analisa kandungan Ca<sup>2+</sup> dengan titrasi menggunakan 0,03 mol/l larutan EDTA dengan indikator *Patton* dan *Reeders* (Torgal dkk., 2013: 126-127).

### **2.7.1.4 Uji Kapur Jenuh**

Metode ini mirip dengan metode frattini, dimana pozzolan dicampur dengan larutan CH jenuh. Pengukuran dari sisa kalsium yang tidak bereaksi menunjukkan jumlah CH yang mengikat pozzolan. Selama proses hidrasi, semen menghasilkan endapan CH yang mana dengan adanya pozzolan, CH akan bereaksi dengan pozzolan membentuk binder (Torgal dkk., 2013: 127). Tidak ada standar paten yang digunakan dalam pengujian menggunakan kapur jenuh ini. Beberapa penelitian yang telah dilakukan hanya menyimpulkan dari penelitiannya masing-masing.

## **2.7.2 Metode tidak langsung**

Metode ini mengukur sifat fisik sampel yang menunjukkan tingkat aktivitas pozzolanik (Donatello dkk., 2010).

### **2.7.2.1 ASTM C618**

Metode sederhana yang dapat digunakan untuk mengetahui aktivitas pozzolanik adalah ASTM C618. ASTM C618 menjelaskan spesifikasi kimia maupun fisika dari pozzolan alam maupun abu terbang sebagai pengganti semen yang terdapat pada tabel 2.6. Pada metode ini terdapat 2 kriteria yang paling penting untuk mengetahui aktivitas pozzolanik, yaitu (Torgal dkk., 2013: 128).

1. Jumlah komponen kimia yang terkandung, yaitu  $\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$

## 2. Indeks kuat tekan yang disebutkan pada ASTM C311

Metode karakterisasi aktivitas pozzolanik dengan data ASTM memiliki sudut pandang yang kurang menguntungkan. Contohnya, tingkat kehalusan dari beberapa pozzolan alam mempengaruhi hasil tes aktivitas pozzolanik. Semakin tinggi tingkat kehalusan pozzolan, maka air yang dibutuhkan untuk mengendalikan mortar meningkat. Hal ini menyebabkan perbandingan w/b meningkat dan menurunkan index kekuatan dari mortar (Torgal dkk., 2013: 128).

Tabel 2.4 Karakteristik Standar Spesifikasi Pozzolan secara Kimia dan Fisika

Persyaratan		Standar Spesifikasi Abu Terbang dan Pozzolan Alam, ASTM C618-89a		
		Kelas N	Kelas F	Kelas C
Persyaratan Kimia	SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	> 70	> 70	> 50
	Sulfur trioksida (SO <sub>3</sub> ), %	< 4	< 5	< 5
	Kelembapan, %	< 3	< 3	< 3
	<i>Loss of ignition</i> , %	< 10	< 6	< 6
Persyaratan Fisika	Jumlah yang tertahan pada ayakan 45µm, %	< 34	< 34	< 34
	<i>Strength activity index</i> dengan Semen Portland, % kubus kontrol			
	Hari ke 7	> 75	> 75	> 75
	Hari ke 28	> 75	> 75	> 75
	<i>Strength activity index</i> dengan kapur, Mpa			
	Hari ke 7	> 5,5	> 5,5	> 5,5
	Kebutuhan air, % kubus kontrol	< 115	< 105	< 105
<i>Autoclave expansion</i> , %	< 0,8	< 0,8	< 0,8	

Sumber: ASTM C311/07 (2007)

### 2.7.2.2 *Strength Activity Index (SAI)*

SAI atau index aktivitas mekanik merupakan pengukuran reaktivitas dengan memantau pengembangan kuat tekan campuran CH dan pozzolan. Kuat tekan tidak hanya bergantung pada jumlah CH yang bercampur dengan pozzolan, tetapi juga bergantung pada efek pengepakan yang diinduksi oleh pozzolan sebagai *filler* dan mikrostruktur produk hidrasi yang terbentuk. Reaktivitas yang diukur sebagai kuat tekan meningkat dengan penurunan ukuran partikel. Efek *filler* dari pozzolan halus mampu mengisi ruang antara partikel besar (Walker, 2011).

Terdapat beberapa standar yang menjadi pedoman dalam uji SAI, diantaranya adalah ASTM C311, 618, 989, dan 1240. ASTM C618 dan C311 mendeskripsikan prosedur uji SAI untuk abu terbang dan bahan pozzolan (terkalsinasi maupun tidak terkalsinasi), ASTM

C989 menjelaskan spesifikasi untuk uji aktivitas *slag* sedangkan ASTM 1240 menjelaskan spesifikasi untuk uji SAI *silica fume* (Baharudeen, 2016).

Metode pengukuran SAI beton campuran pozzolan alam yang dijelaskan dalam ASTM C311 yaitu disiapkan menggunakan semen dan pasir dengan rasio 1 : 2,75 dan rasio semen dan air adalah 0,484. Kandungan air konstan untuk beton kontrol adalah 242 mL. 20% massa semen digantikan dengan pozzolan sebagai SCMs. Beton yang telah tercetak di simpan dan direndam dalam larutan kapur jenuh pada suhu 25°C (untuk mencegah terjadinya leaching CH) atau yang seringkali disebut dengan tahap *curing*. Kemudian dilakukan uji kuat tekan setelah 7 dan 28 hari *curing* (Baharudeen, 2016). Beberapa alat yang digunakan untuk uji kuat tekan antara lain *hammer* dan *hydraulic hand pump* dengan memberi beban pada beton tiap satuan luas hingga beton hancur.

SAI dihitung berdasarkan persentase rasio antara kuat tekan beton campuran SCMs dengan beton kontrol. Kuat tekan untuk abu terbang dan pozzolan alam minimal memiliki 75% dari kuat tekan beton kontrol (Baharudeen, 2016). Rumus perhitungan SAI yaitu :

$$SAI = \frac{A}{B} \times 100 \quad (2-1)$$

Keterangan :

A : Kekuatan tekan spesimen pozzolan uji yang nilainya tidak terbatas (MPa)

B : Kekuatan tekan beton kontrol (MPa)

### 2.7.2.3 Metode Konduktivitas

Konduktivitas listrik merupakan ukuran dari kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan arus listrik dalam temperatur tertentu. Konduktivitas listrik juga merupakan sifat penting suatu bahan, namun tidak semua bahan memiliki konduktivitas listrik yang baik. Sifat kelistrikan atau konduktivitas listrik tersebut dipengaruhi oleh molekul atau susunan atom dan komponen kimianya. Faktor yang mempengaruhi adanya sifat kelistrikan adalah homogenitas permukaan, distribusi dan ukuran pori, serta susunan partikel sesuai dengan hasil morfologi permukaan yang ditunjukkan oleh hasil karakterisasi SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Hasil tersebut juga diperkuat dengan besarnya luas permukaan spesifik dimana besarnya luas permukaan dikarenakan porositas dan ukuran pori bahan. Semakin banyak pori, semakin besar pula luas permukaan yang dimiliki (Sembiring dan Simanjuntak, 2015). Ukuran partikel yang seragam akan memudahkan elektron-elektron mengalir, sehingga mempengaruhi besarnya nilai konduktivitas listrik

Metode ini dilakukan dengan cara melarutkan CH dalam air deionisasi dengan kondisi jenuh, kemudian dilakukan penambahan pozzolan yang dapat menciptakan kondisi

*unsaturated*. Ketika kondisi menjadi *unsaturated*, konduktivitas yang hilang dari larutan semakin besar yaitu bisa mencapai lebih dari 30% dan variasi pH campuran semakin tinggi, 0,15 kali dari pH semula. Konduktivitas listrik dari larutan tergantung pada jumlah ion di dalam larutan. Konduktivitas listrik mengalami penurunan akibat interaksi antara ion  $\text{Ca}^{2+}$  dan ion  $\text{OH}^-$  dengan pozzolan untuk membentuk produk sehingga terjadi pengurangan ion yang mengakibatkan penurunan konduktivitas listrik. Interaksi ini tergantung pada tingkat reaktivitas pozzolanik dari pozzolan yang diuji (Tashima, 2014).

## 2.8 Beton

Beton merupakan bahan bangunan yang dibuat dengan mencampurkan semen, air, agregat halus dan kasar dan bahan lainnya secara bersamaan. Beton biasanya digunakan pada konstruksi jalan, pondasi bangunan, bendungan dan lain-lain. Bahan dicampurkan dengan komposisi yang sesuai untuk menghasilkan kuat tekan yang diinginkan dan digunakan sesuai kebutuhan. Kuat tekan beton utamanya dipengaruhi oleh komposisi bahan, cara pencampuran dan letak beton tersebut. Parameter kualitas beton selain kuat tekan juga dilihat dari daya tahannya, struktur fisik, kemudahan konstruksi dan ekonomi (Gopi, 2010).

### 2.8.1 Bahan baku beton dan fungsinya

Beton semen merupakan bahan komposit dari beberapa bahan mineral yang membentuk binder karena ada medium yang membuat beton mengeras dan kuat. Pasir dan kerikil merupakan bahan inert yang disebut agregat yang akan berkombinasi dengan semen *Portland* dan air membentuk binder (Gopi, 2010). Terdapat 4 bahan utama pada pembuatan komposit beton yaitu :

#### a. Semen

Fungsi dari semen yaitu sebagai pengikat partikel agregat kasar dan halus yang menyebabkan pengerasan pada sekitar permukaan tersebut sebagai hasil reaksi hidrasi dengan air. Terdapat beberapa jenis semen yang berbeda, dimana setiap jenisnya menyesuaikan dengan kondisi tertentu tergantung keadaan pengaplikasiannya, tetapi yang paling umum untuk konstruksi biasanya digunakan *Ordinary Portland Cement* (Gopi, 2010:112).

Senyawa silika yang bereaksi dengan  $\text{CaO}$  menghasilkan trikalsium silikat dan dikalsium silikat. Senyawa tersebut merupakan bagian paling dominan dalam memberikan sifat kekuatan pada semen (Febrianto, 2011). Senyawa alumina berguna untuk ketahanan

semen terhadap sulfat dan kemampuannya untuk meningkatkan kekuatan sangat cepat. Namun senyawa alumina dibatasi penggunaannya karena memiliki kekurangan dapat menurunkan kekuatan dalam jangka waktu lama dan menyebabkan keretakan pada keadaan tertentu (Nawy, 2008:10). Senyawa  $SO_3$  juga berperan dalam meningkatkan kekuatan beton (Kitazume, 2013: 42). Senyawa alkali pada semen ( $K_2O$  dan  $Na_2O$ ) dalam jumlah yang besar akan menimbulkan kerugian pada beton dalam jangka panjang yaitu adanya reaksi alkali silika yang menyebabkan keretakan pada beton. Untuk itu kandungan alkali harus dibatasi dalam semen yaitu  $Na_2O + 0,6K_2O$  kurang dari 0,60 (Nawy, 2008:20).

### b. Agregat Halus

Merupakan bahan inert yang bertujuan mengisi ruang kosong antar partikel kasar, sehingga menurunkan porositas dari total massa beton dan meningkatkan kuat tekan serta mengurangi biaya pembuatan. Agregat halus yang umum digunakan adalah pasir, namun beberapa bahan telah dikembangkan untuk beton dengan tujuan khusus (Gopi, 2010:112). Pada Tabel 2.7 menjelaskan ukuran agregat halus berdasarkan ASTM.

Tabel 2.5 Ukuran Agregat Halus

Ukuran Sieve	Bukaan Ayakan	% Lolos
	9,5 mm ( $3/8$ in)	100
4 mesh	4,75 mm	95-100
8 mesh	2,36 mm	80-100
14 mesh	1,18 mm	50-85
28 mesh	600 $\mu$ m	25-60
48 mesh	300 $\mu$ m	5-30
100 mesh	150 $\mu$ m	0-10

Sumber: ASTM C 33-03 (2003)

Agregat halus yang digunakan sebagai beton juga harus bersih dari komponen-komponen pengganggu misalnya senyawa organik dan senyawa alkali. Kandungan senyawa organik dalam agregat halus maksimal sebesar 15%, hal ini karena senyawa organik dapat menyebabkan perusakan warna pada beton dan juga menurunkan kuat tekan beton. Untuk mengetahui kandungan senyawa organik pada pasir metode yang paling sederhana adalah uji *loss of ignition* (LOI). Ketika nilai LOI lebih kecil dari 15% maka akan didapatkan kekuatan beton yang tinggi (Kitazume,2013:51).

### c. Agregat Kasar

Agregat Kasar merupakan bahan inert yang tertahan pada ayakan 4,75 mm dan mengandung tidak lebih dari 0-10% dari bahan yang halus. Fungsi dari agregat kasar yaitu berperan sebagai pengisi utama komponen beton. Biasanya yang digunakan sebagai

agregat kasar yaitu kerikil atau pecahan dari bebatuan. Agregat yang digunakan pada beton harus keras, bersih bebas dari lumpur, debu, senyawa organik dan memiliki daya tahan yang kuat (Gopi, 2010:113).

#### **d. Air**

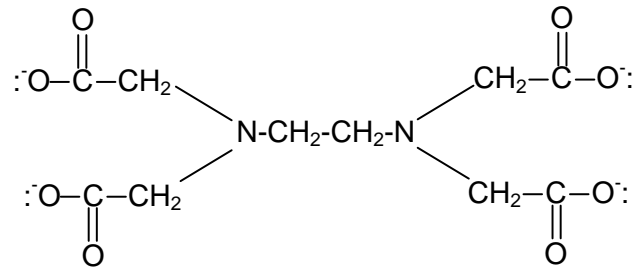
Air merupakan komponen paling penting dalam beton. Air menentukan sifat dari beton seperti daya tahan dan kekuatan. Tujuan dari penambahan air yaitu untuk reaksi hidrasi semen sehingga menghasilkan C-S-H dan merekatkan agregat (Gopi, 2010:113). Kualitas air yang digunakan pada beton tidak terlalu spesifik karena kualitas beton tetap baik walaupun menggunakan air yang tidak bisa diminum karena yang terpenting adalah jumlah air yang dicampurkan (Nawy, 2008:12).

### **2.9 Titrasi Kompleksometri**

Titration kompleksometri merupakan titration yang berdasarkan reaksi pembentukan senyawa kompleks antara ion logam dengan zat pembentuk kompleks. Senyawa kompleks terdiri dari akseptor elektron yaitu berupa ion logam atau atom netral dan donor elektron yang berupa molekul yang bukan ion logam. Donor elektron disebut ligan yang memiliki setidaknya 1 pasangan elektron bebas dan berperan sebagai basa Lewis (donor pasangan elektron). Ion logam berperan sebagai asam Lewis (akseptor pasangan elektron). Ligan disebut juga agen pengkelat karena membentuk cincin stabil yang disebut cincin kelat ketika bereaksi dengan ion logam. Jika sebuah ion logam sebagai analit dan titrannya berupa ligan maka reaksi yang terjadi selama titration adalah reaksi kompleks (Dash, 2011).



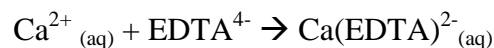
Pada titration ini diperlukan agen pengompleks yang biasanya menggunakan EDTA (Etilen diamin tetra asetat). Garam dinatrium etilen diamin tetra asetat (EDTA) akan bereaksi dengan kation logam tertentu membentuk senyawa kompleks kelat yang larut. EDTA adalah senyawa asam berbasa empat yang secara sederhana ditulis sebagai  $H_4Y$ . Di dalam pelarut air, senyawa ini ( $H_4Y$ ) dapat terdisosiasi menjadi beberapa spesi ( $H_3Y^-$ ,  $H_2Y^{2-}$ ,  $HY^{3-}$ , dan  $Y^{4-}$ ) dengan komposisi yang bergantung pada pH larutan. Pada titration pembentukan kompleks, ion-ion logam bereaksi dengan spesi  $Y^{4-}$  karena spesi ini merupakan spesi yang paling basa dibanding spesi lainnya (Kenkel, 2003:120). Struktur EDTA ditunjukkan pada gambar 2.3 dibawah ini.



Gambar 2.3 Struktur Kerangka EDTA

Sumber: Kenkel (2003:120)

Indikator selalu diperlukan pada proses titrasi yang bertujuan untuk menentukan titik akhir titrasi. Indikator yang sesuai dengan titrasi kompleksometri salah satunya yaitu EBT (*Eriochrome Black T*). Pada pH 12-13 ion-ion kalsium dalam contoh uji akan bereaksi dengan indikator EBT, dan membentuk larutan berwarna merah keunguan. Jika Na<sub>2</sub>EDTA ditambahkan sebagai titran, maka ion-ion kalsium akan membentuk senyawa kompleks, molekul indikator terlepas kembali, dan pada titik akhir titrasi larutan akan berubah warna dari merah keunguan menjadi biru. Reaksi ion logam Ca dengan EDTA saat titrasi yaitu:



Reaksi antara kalsium dan EDTA ini sangat bergantung pada pH, sehingga perlu pH basa yang cukup tinggi agar ion logam lain mengendap misalnya logam Mg yang mengendap sebagai magnesium hidroksida (SNI, 2004).

Penentuan konsentrasi kalsium pada titrasi kompleksometri dengan titran EDTA menggunakan persamaan berikut (SNI, 2004) :

$$\text{Kadar kalsium (mg Ca/L)} = \frac{1000}{V_{C.u}} \times V_{\text{EDTA (b)}} \times M_{\text{EDTA}} \times 40 \quad (2-2)$$

Keterangan :

V C.u = volume larutan contoh uji (ml)

V<sub>EDTA (b)</sub> = volume rata-rata larutan baku Na<sub>2</sub>EDTA untuk titrasi kalsium (ml)

M<sub>EDTA</sub> = molaritas larutan baku Na<sub>2</sub>EDTA untuk titrasi (mmol/ml)

## 2.10 Screening

*Screening* merupakan suatu proses pemisahan secara mekanik berdasarkan perbedaan ukuran partikel suatu material. *Screening* bertujuan untuk memisahkan antara partikel yang lolos ayakan (ukuran diameter partikel < bukaan ayakan) dan yang tertinggal diayakan (ukuran diameter partikel > bukaan ayakan). Ukuran butiran tertentu yang masih bisa melintasi ayakan dinyatakan sebagai butiran halus. Terdapat beberapa hal yang harus



diperhatikan dalam pengayakan, yaitu jenis pengayakan, cara pengayakan, kecepatan pengayakan, ukuran pengayakan, sifat bahan yang akan diayak (Dorf, 2005:64-65).

Suatu ayakan terbuat dari kawat dengan ukuran lubang tertentu. Istilah *mesh* digunakan untuk menyatakan jumlah lubang tiap inci linear. Pada tabel 2.8 dibawah ini adalah konversi nomor standar sesuai *US Sieve* dengan *Tyler Equipment* dan masing-masing ukuran lubang ayakan dinyatakan dalam milimeter (mm) dan inch (in) (Toledo, 1994: 539)

Tabel 2.6 Bukaian lubang dan ukuran ayakan (*US Sieve Series and Tyler Equivalent*)

Ukuran <i>Sieve</i> US	<i>Tyler Equivalent</i>	Bukaian Ayakan	
		Mm	In
No. 120	115 <i>mesh</i>	0,125	0,0049
No. 140	150 <i>mesh</i>	0,105	0,0041
No. 170	170 <i>mesh</i>	0,088	0,0035
No. 200	200 <i>mesh</i>	0,074	0,0029
No. 230	250 <i>mesh</i>	0,063	0,0025
No. 270	270 <i>mesh</i>	0,053	0,0021
No. 325	325 <i>mesh</i>	0,044	0,0017
No. 400	400 <i>mesh</i>	0,037	0,0015

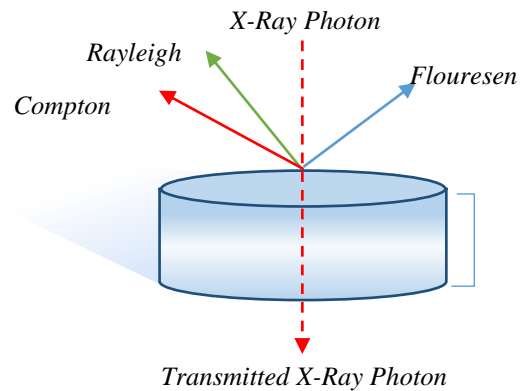
Sumber: Toledo (1994: 539)

### 2.11 Spektrofotometer XRF (*X-Ray Fluorescence*)

Spektrofotometer XRF merupakan alat untuk menentukan komposisi kimia semua bahan. Bahan yang diuji bisa berupa padat, cair, serbuk dan bentuk lainnya. XRF juga bisa digunakan untuk menentukan ketebalan dan komposisi dari lapisan bahan. Analisis XRF bisa berupa kualitatif dan kuantitatif. Pada XRF, sinar X dihasilkan dari sumber berupa tabung sinar X menuju sampel. Unsur yang ada dalam sampel akan memancarkan radiasi sinar X *fluorescence* sesuai dengan karakteristik energi tiap unsur (sama dengan warna pada cahaya optik). Pada analisis secara kualitatif energi yang berbeda-beda yang dipancarkan diwakili dengan warna yang berbeda, sehingga dengan mengukur energi (berdasarkan warna) dari radiasi yang dipancarkan oleh sampel bisa menentukan apa saja unsur yang ada di dalam sampel. Sedangkan analisis kuantitatif diukur berdasarkan pengukuran besar intensitas dari energi yang dipancarkan dari sampel. Berikut gambar 2. adalah skema analisis Spektrofotometer XRF (Brouwer,2010).

Sinar X termasuk gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang dan energi antara sinar gama ( $\gamma$ -Ray) dan sinar ultraviolet. Panjang gelombang sinar X berada

pada rentang antara 0.01 sampai 10 nm yang sama dengan energi pada rentang 0.125 sampai 125 keV (Brouwer,2010).



Tabel 2.7 Skema Uji Spektrofotometer XRF (X-Ray Fluorescence)

Sumber: Brouwer (2010)

## 2.12 Penelitian Sebelumnya

Penelitian terkait karakterisasi pozzolan alam berdasarkan aktivitas pozzolaniknya dengan variasi ukuran partikel menggunakan beberapa metode yang telah dilakukan sebelumnya ditabulasikan pada Tabel 2.8 sebagai berikut.

Tabel 2.8 Penelitian-penelitian sebelumnya yang telah dilakukan

No	Peneliti, Tahun	Kondisi Percobaan	Hasil
1	Lam dkk., 2011	<ul style="list-style-type: none"> <li>Batuan zeolit alam dari Tasajeras, Cuba</li> <li>Variasi 4 ukuran zeolit <math>D_{50}</math> (<math>\mu\text{m}</math>) (diameter) yaitu Z1 = 84,8; Z2 = 67,5; Z3 = 63,5; Z4 = 17,4.</li> <li>Uji konduktivitas : 3 gram zeolit dilarutkan dalam larutan jenuh CH 25 mL dengan konsentrasi awal 9,2 mmol/l pada <math>T = 40 \pm 1^\circ\text{C}</math> menggunakan PRACITRONIC MV 870 <i>microconductimeter</i> selama 360 jam</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semakin halus ukuran zeolit maka aktivitas pozzolanik semakin besar ditandai dengan nilai konduktivitas Z4 yang lebih rendah dan Z1 yang tertinggi. Penurunan nilai konduktivitas menunjukkan adanya pembentukan fase hidrat melalui penurunan konsentrasi CH.</li> <li>Reaktivitas semakin meningkat dengan semakin kecil ukuran zeolit. Hal ini dikarenakan meningkatnya permukaan spesifik yang mempercepat reaksi hidrasi</li> </ul>
2	Chindaprasirt, 2007	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uji aktivitas pozzolanik dengan metode XRD untuk mengetahui konsumsi CH pada pasta semen dan uji SEM.</li> <li>Variabel bebas <i>Original fly ash</i> (OFA) dengan ukuran partikel rata-rata 19,1 <math>\mu\text{m}</math> dan <i>Classified fly ash</i> (CFA) dengan ukuran partikel rata-rata 6,4 <math>\mu\text{m}</math>.</li> <li>Pengukuran kadar CH dilakukan pada hari ke-28, 60 dan 90 proses <i>curing</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semakin kecil ukuran partikel maka semakin tinggi konsumsi CH pada pasta semen.</li> <li>Semakin kecil ukuran partikel akan semakin mudah untuk terdispersi ke dalam campuran pasta semen dan membentuk pasta semen yang lebih homogeny serta menurunkan diameter pori pasta.</li> </ul>
3	Chindaprasirt, 2004	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Original fly ash</i> (OFA) dengan ukuran partikel rata-rata 19,1 <math>\mu\text{m}</math> dan <i>Classified fly ash</i> (CFA) dengan ukuran partikel rata-rata 6,4 <math>\mu\text{m}</math>.</li> <li><i>Fly ash</i> digunakan untuk menggantikan penggunaan <i>Portland cement</i> sebanyak 0%, 20% dan 40%.</li> <li>Uji SAI dilakukan pada hari ke 7, 28, 60 dan 90 hari.</li> <li>Pengukuran total pori, pori kapiler, pori <i>gel</i> dan distribusi ukuran pori dengan <i>mercury intrusion porosimeter</i> (MIP)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semakin kecil ukuran partikel (CFA) akan meningkatkan pori <i>gel</i> dibandingkan dengan OFA dan kontrol.</li> <li>Distribusi ukuran pori dan diameter rata-rata ukuran pori akan menurun seiring dengan peningkatan jumlah kandungan FA dan kehalusan FA.</li> <li>CFA 20% lebih efektif dalam mengurangi rata-rata ukuran pori dan meningkatkan kuat tekan.</li> </ul>