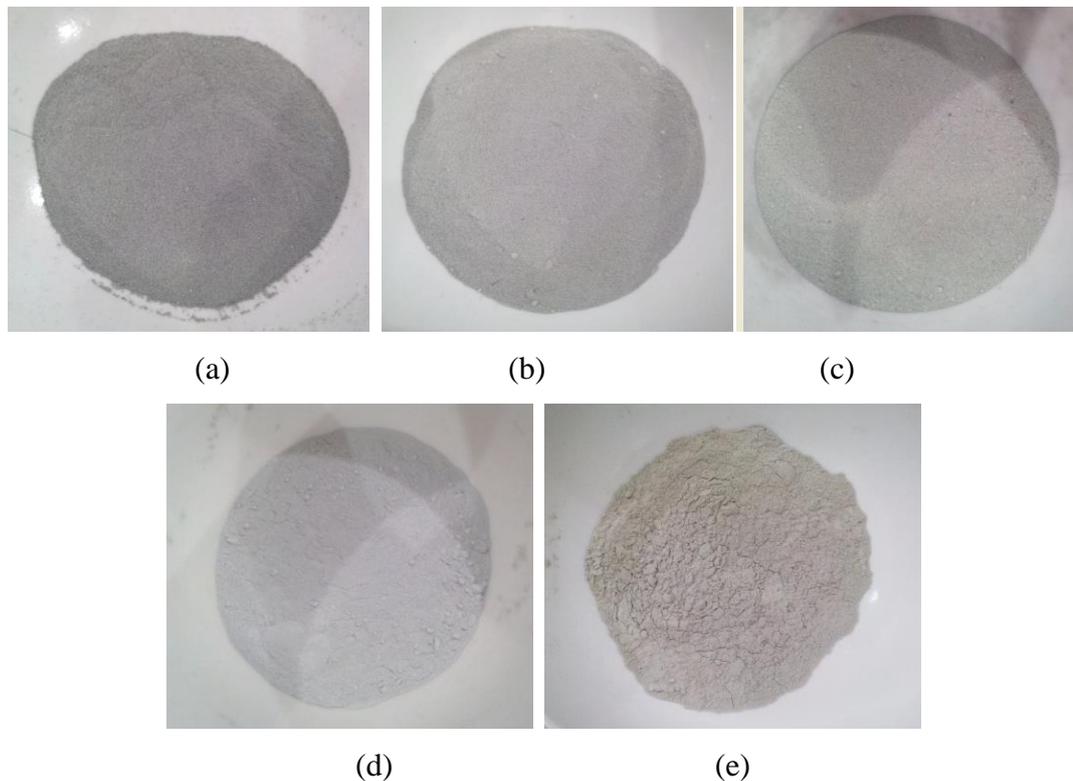


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakterisasi Zeolit Alam Malang

Zeolit alam Malang yang digunakan dilakukan pengecilan ukuran dengan cara ditumbuk kemudian diayak sesuai variabel ukuran yang akan digunakan dan dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui kandungan senyawanya. Berikut ini adalah hasil ayakan zeolit berdasarkan variasi ukuran dan karakterisasi zeolit alam Malang berdasarkan uji XRF dan standar ASTM C618-89a kelas C.

4.1.1 Hasil Ayakan Zeolit Variasi Ukuran



Gambar 4.1 Zeolit dengan Variasi Ukuran (a) 130-105 μm (Variabel 1); (b) 105-74 μm (Variabel 2); (c) 74-63 μm (Variabel 3); (d) 63-44 μm (Variabel 4); (e) 44 μm < (Variabel 5)

4.1.2 Hasil Uji XRF Zeolit Alam Malang

Tabel 4.1 Komposisi Kimia Zeolit Alam Malang Berdasarkan Uji XRF

Senyawa	Konsentrasi (%)
SiO ₂	38,5
Al ₂ O ₃	8,3
P ₂ O ₅	1,7
SO ₃	1,4
K ₂ O	2,35
CaO	27,2
TiO ₂	1,08
V ₂ O ₅	0,05
Cr ₂ O ₃	0,13
MnO	0,86
Fe ₂ O ₃	15,3
NiO	0,041
CuO	0,076
ZnO	0,09
SrO	0,22
MoO ₃	2,4
Eu ₂ O ₃	0,06
Yb ₂ O ₃	0,04
Re ₂ O ₇	0,22

4.1.3 Hasil Uji Karakterisasi Zeolit Alam Malang Berdasarkan ASTM

Tabel 4.2 Data Hasil Uji Karakterisasi Zeolit Alam Malang

No	Persyaratan	ASTM C618-89a			Zeolit Alam Malang
		Kelas N	Kelas F	Kelas C	
1	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ , %	> 70	> 70	> 50	62,1
2	Sulfur Trioksida (SO ₃), %	< 4	< 5	< 5	1,4
3	Kelembapan, %	< 3	< 3	< 3	2,765
4	<i>Loss of ignition</i> , %	< 10	< 6	< 6	15

Karakterisasi zeolit alam malang berdasarkan ASTM C618-89a diatas menunjukkan bahwa zeolit alam malang merupakan pozzolan yang telah memenuhi ASTM C618-89a kelas C. Parameter yang digunakan adalah total kandungan SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃, kandungan SO₃, kelembapan dan LOI. Kandungan SiO₂, Al₂O₃ dan Fe₂O₃ berturut-turut yaitu 38,5%; 8,3% dan 15,3%. Kandungan SiO₂ dan Al₂O₃ berperan sebagai senyawa yang bereaksi dengan CH hasil hidrasi semen untuk membentuk C-S-H dan C-A-S-H. Al₂O₃ juga berperan untuk ketahanan beton terhadap sulfat. Selain itu, ion Al dalam zeolit ini dapat meningkatkan jumlah fase cair dengan menurunkan viskositasnya, sehingga memungkinkan difusi spesies kimia yang lebih baik dan mendukung pertumbuhan C-S-H.

Kandungan Fe_2O_3 juga berperan dalam meningkatkan kekuatan beton, namun dengan adanya kandungan silika yang tinggi, Fe_2O_3 tidak akan berperan besar (Joshi, 1997:32).

LOI menunjukkan jumlah zat organik dalam zeolit, terutama karbon yang merupakan senyawa pengganggu, sehingga LOI harus dibatasi jumlahnya. Namun, LOI yang dihasilkan dari pozzolan alam Malang tidak terkait dengan adanya karbon bebas namun terkait dengan adanya mineral yang terdekomposisi selama proses pemanasan sehingga nilai LOI yang dimiliki diluar normal dan standart (Schlorholtz, 2006).

Kandungan SO_3 (%) mewakili kandungan sulfur pada zeolit. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kandungan SO_3 hingga mencapai 17% tidak memberikan perubahan volume yang signifikan terhadap beton (Schlorholtz, 2006).

Selain komponen diatas, aktivitas pozzolanik sangat dipengaruhi oleh kandungan CaO, rasio Si/Al, kandungan senyawa alkali dan senyawa oksida lainnya. Pozzolan dikatakan mengandung kalsium yang tinggi apabila kandungan CaO > 10%. Sehingga, zeolit alam Malang merupakan pozzolan dengan kandungan kalsium yang tinggi. Kandungan CaO bebas dapat mempengaruhi stabilitas volume dan daya tahan beton serta dapat terhidrasi dengan cepat menjadi CH (Fan dkk., 2015).

Tidak ada batasan yang ditetapkan pada kandungan alkali dari pozzolan oleh ASTM C618 (Thomas, 2007). Semakin tinggi kandungan alkali dalam pozzolan dapat mempercepat pelepasan silika dari pozzolan karena senyawa alkali mampu menaikkan pH larutan saat perncampuran dalam beton dan pH tinggi dapat mempercepat pelepasan silika dari pozzolan. Namun, banyaknya senyawa alkali juga dapat menyebabkan struktur zeolit bermuatan negatif sehingga menghalangi difusi ion hidroksil untuk masuk hingga ke struktur zeolit terdalam (Radeka, 2016).

4.2 Hasil Karakterisasi Bahan Pembuatan Beton

1. Semen

Semen yang digunakan telah dikarakterisasi menggunakan XRF untuk mengetahui kandungan senyawanya. Tabel 4.3 berikut merupakan hasil uji XRF semen yang digunakan. Sedangkan tabel 4.4 merupakan hasil karakterisasi semen yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 4.3 Hasil Uji XRF Semen

Senyawa	Konsentrasi (%)
SiO ₂	13,0
SO ₃	1,9
K ₂ O	0,63
CaO	76,11
TiO ₂	0,4
V ₂ O ₅	0,03
Cr ₂ O ₃	0,061
MnO	0,090
Fe ₂ O ₃	4,56
CuO	0,04
SrO	0,88
ZrO ₂	0,1
MoO ₃	0,3
In ₂ O ₃	1,5
BaO	0,09
Eu ₂ O ₃	0,01
Yb ₂ O ₃	0,25

Berdasarkan tabel 4.3 dapat dilihat bahwa senyawa alkali pada semen yang digunakan memenuhi persyaratan ($\text{Na}_2\text{O}+0,6\text{K}_2\text{O}<0,6$) yaitu sebesar 0,378 sehingga bisa meminimalkan terjadinya reaksi silika alkali pada beton (Nawy, 2008:20). Rasio w/c yang digunakan dalam pembuatan kontrol dan beton uji adalah sama yaitu berdasarkan ASTM C311 sebesar 0,484.

Tabel 4.4 Karakterisasi Semen yang digunakan berdasarkan standar OPC

Persyaratan		OPC (<i>Ordinary Portland Cement</i>)	Semen yang digunakan
Persyaratan Kimia Rendell (2002:7)	SiO ₂ (%)	21	13,0
	CaO (%)	63	76,11
	Al ₂ O ₃ (%)	5	-
	Fe ₂ O ₃ (%)	3	4,56
	MgO (%)	2	-
Persyaratan Fisika (SNI, 2004)	Kuat tekan 7 hari (MPa)	20	25,88
	Kuat tekan 28 hari (MPa)	28	38,48

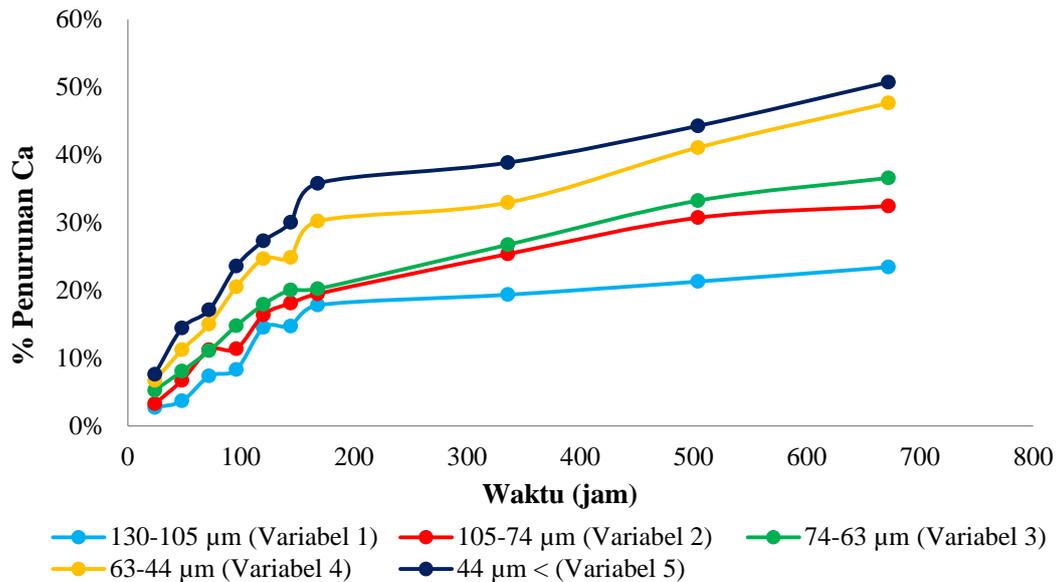
Berdasarkan tabel 4.4 semen yang digunakan tidak memenuhi standar OPC karena kadungan CaO yang tinggi. Namun kuat tekan yang dihasilkan telah memenuhi standar kuat tekan OPC pada 7 dan 28 hari. Hal ini membuktikan bahwa tingginya kandungan CaO tidak berpengaruh terhadap kuat tekan beton hingga 28 hari.

2. Pasir

Pasir yang digunakan pada penelitian ini secara fisik adalah pasir yang berwarna hitam karena kandungan lumpurnya yang lebih rendah dari pada pasir yang berwarna coklat. Ukuran agregat halus yang digunakan sesuai dengan ketentuan yang ada di ASTM C33-03.

4.3 Karakterisasi Aktivitas Pozzolanik

4.3.1 Uji Kapur Jenuh



Gambar 4.2 Grafik Hubungan antara Waktu (jam) terhadap % Penurunan Konsentrasi Ca^{2+}

Gambar 4.2 bertujuan untuk mengetahui kereaktifan zeolit terhadap ion Ca^{2+} yang diukur berdasarkan konsentrasi ion Ca^{2+} yang tidak bereaksi dengan spesies Si dan Al pada zeolit. Adanya reaksi antara ion Ca^{2+} dan spesies Si dan Al ini akan membentuk C-S-H dan C-A-H yang merupakan produk binder yang diharapkan.

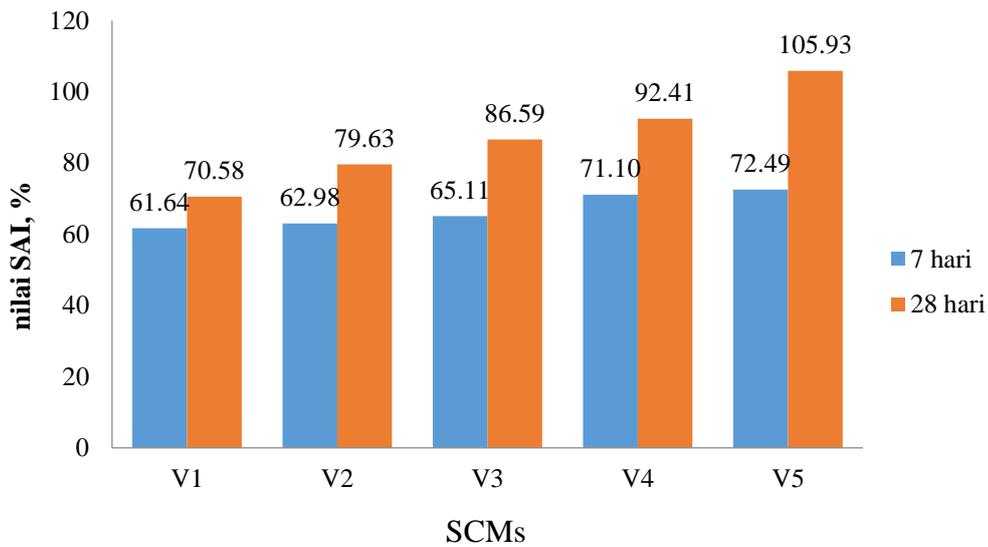
Berdasarkan gambar 4.2, % penurunan konsentrasi Ca^{2+} mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya waktu pendiaman. Hal ini terjadi dikarenakan adanya reaksi pozzolanik antara CH dan zeolit. Berdasarkan pendekatan yang ada, ketika CH dan zeolit dicampur dengan air, akan melepaskan kation *extraframework* (kation diluar tetrahedral) seperti K^+ , dan Ca^{2+} . Kation ini seringkali dirumuskan sebagai M_xD_y dalam struktur zeolit dimana M adalah kation monovalen dan D adalah kation divalen. Terlepasnya kation menyebabkan permukaan zeolit kaya akan Si dan Al amorf yang akan berikatan dengan OH^- dan Ca^{2+} membentuk C-S-H dan C-A-H (Papadakkis, 1992).

Gambar 4.2 menunjukkan adanya pengaruh ukuran partikel terhadap % penurunan ion Ca^{2+} terhadap waktu pendiaman campuran. Persentase penurunan ion Ca^{2+} tertinggi yaitu

zeolit dengan ukuran partikel $<44 \mu\text{m}$ Hal ini dikarenakan reaktivitas dari pozzolan dipengaruhi oleh ukuran partikel dimana seolah-olah lapisan tetrahedral zeolit dengan ukuran partikel $44 \mu\text{m} <$ hanya terdiri dari 1 layer sehingga seolah-olah bisa bereaksi secara langsung dengan Si dan Al dalam ikatan tetrahedral zeolit dan mengurangi perpindahan massa yang terjadi sehingga laju difusi Ca^{2+} dan OH^- untuk berikatan dengan Si dan Al lebih tinggi.

Berdasarkan gambar 4.2. terjadi peningkatan persentase penurunan ion Ca^{2+} yang cukup tajam pada 7 hari pertama dibandingkan 7 hari berikutnya. Hal ini dikarenakan, pada uji kapur jenuh, ion Ca^{2+} yang diberikan merupakan hasil ionisasi CH dengan air, yang mana proses ini berlangsung spontan, dan Ca yang telah terionisasi akan segera bereaksi dengan Si dan Al amorf untuk membentuk C-S-H dan C-A-H. Proses reaksi ini berlangsung cepat diawal karena konsentrasi CH yang berlebih mendukung proses pelepasan Si dan Al amorf dari struktur zeolit ke permukaan zeolit untuk membentuk *thin film* kaya Si dan Al amorf yang akan berikatan dengan C-S-H dan C-A-H. Namun, terbentuknya C-S-H dan C-A-H dipermukaan zeolit ini semakin lama akan menutup permukaan zeolit yang berkontak dengan lingkungan reaksi sehingga memperlambat proses pelepasan Si dan Al amorf yang masih ada di struktur zeolit dan C-S-H dan C-A-S-H yang terbentuk akan semakin sedikit, hal ini dibuktikan bahwa ion Ca^{2+} yang dikonsumsi semakin sedikit dan mendekati konstan. Selain itu, permukaan spesifik yang tinggi membuat reaksi CH dengan zeolit menjadi lebih mudah. Namun, menurut Massazza, pengaruh luas permukaan spesifik 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).

4.3.2 Uji SAI Beton



Gambar 4.3 Grafik SAI pada Hari ke-7 dan ke-28 Variabel 1 (130-105 μm), Variabel 2 (105-74 μm), Variabel 3 (74-63 μm), Variabel 4 (63-44 μm), Variabel 5 (<44 μm)

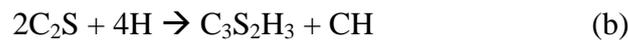
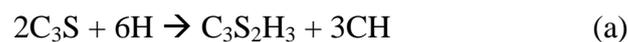
Gambar 4.3 bertujuan untuk mengetahui kereaktifan zeolit terhadap ion Ca^{2+} yang diukur berdasarkan kuat tekan campuran zeolit, semen, air dan pasir. Kemampuan zeolit sebagai SCMs berdasarkan uji SAI kereaktifannya berbeda jika berdasarkan uji kapur jenuh. Pada uji SAI, zeolit berperan sebagai bahan *supplement* sehingga akan banyak reaksi yang terjadi dan akan banyak hambatan untuk bereaksi pozzolanik di dalam sistem tersebut, dan ion Ca^{2+} yang akan bereaksi dengan spesies Si dan Al dari zeolit merupakan hasil hidrasi semen. Namun, pada uji kapur jenuh, zeolit berperan sebagai reaktan utama sehingga reaksi spesies Si dan Al dari zeolit dengan ion Ca^{2+} tidak dihambat oleh reaktan lainnya

Data pada gambar 4.3 menjelaskan adanya pengaruh ukuran terhadap aktivitas pozzolanik dari zeolit. Hal ini dikarenakan zeolit memiliki 2 peran yaitu sebagai *filler* atau pengisi dan merupakan bagian dari pasta semen. Peran zeolit sebagai *filler* sangat dipengaruhi oleh ukurannya dimana semakin kecil dan seragam ukuran zeolite dengan ukuran partikel semen yang digunakan dapat menciptakan beton yang lebih kokoh karena zeolit tersebut mampu mengisi pori-pori yang terbentuk oleh agregat lain. Semakin kecil ukuran partikel SCMs yang digunakan maka semakin kecil ukuran pori/celah yang mampu diisi oleh partikel SCMs tersebut sehingga porositas beton yang dihasilkan semakin rendah yang ditunjukkan oleh zeolit dengan ukuran partikel <44 μm pada proses *curing* 28 hari.

Peran kedua zeolit sebagai bagian dari pasta semen berhubungan dengan reaktivitas zeolit sebagai pozzolan yang dipengaruhi oleh ukuran partikel. Ukuran partikel

berpengaruh terhadap permukaan zeolit yang akan terekspos pada proses reaksi kimia. Proses ini akan meningkat ketika luas permukaannya meningkat atau ukuran partikel menurun (Walker dkk., 2011). Zeolit dengan ukuran partikel $<44 \mu\text{m}$ mampu meningkatkan laju dekomposisi SCMs, karena semakin kecil kerangka zeolit/partikel yang terekspos pada reaksi kimia dapat mempercepat proses difusi OH^- untuk memutuskan ikatan silika dalam kerangka zeolit melalui air yang ada pada celah (*void*) zeolit sebagai media difusi. Silika kemudian berikatan dengan Ca^{2+} dan membentuk C-S-H untuk menyempurnakan pasta semen yang terbentuk dan mengurangi porositasnya sehingga memberikan kekuatan yang meningkatkan kinerja beton jangka panjang.

Mekanisme yang terjadi ketika air ditambahkan pada campuran kering semen dan SCMs yaitu proses inisiasi 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°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 (d). Reaksi tersebut berlangsung sangat cepat dan menghasilkan panas reaksi yang tinggi (Newman, 2003:15-17).

Sedangkan reaksi pada SCMs adalah sebagai berikut :



Pada awal pencampuran dengan semen, pozzolan berperilaku sebagai bahan *inert* karena reaksi pozzolanik akan terjadi setelah CH hasil hidrasi semen telah terbentuk, sehingga tidak berperan dalam tingkat kekuatan awal beton. Namun, pada usia yang lebih

tua, reaksi pozzolanik dimulai dan semen pozzolan mencapai kekuatan yang sama atau lebih tinggi dari pada tanpa pozzolan (Walker, dkk. 2011). Hal ini ditunjukkan pada gambar grafik 4.7 dimana kuat tekan beton usia 7 hari dengan penggantian semen sebesar 20% cenderung konstan dan tidak ada yang melebihi kekuatan beton kontrol. Kekuatan beton akan meningkat dari waktu ke waktu dan pada akhirnya akan sama atau bahkan melebihi kekuatan beton tanpa campuran SCMs seperti data hasil kuat tekan pada beton hari ke-28 yang meningkatkan hingga 105,93% terhadap kuat tekan beton kontrol oleh zeolit dengan ukuran partikel $44 \mu\text{m} <$.

Kemampuan zeolit sebagai SCMs ketika menjadi reaktan dominan seperti pada sistem uji kapur jenuh berbeda ketika zeolit sebagai bahan *supplement* pada sistem uji SAI. Hal ini dikarenakan pada uji kapur jenuh, Ca^{2+} telah tersedia secara langsung yang dibuktikan dengan *slope* yang tajam di 7 hari pertama pencampuran sedangkan pada uji SAI Ca^{2+} merupakan hasil hidrasi semen yang menunggu semen mengalami reaksi hidrasi, dibuktikan dengan gambar 4.3 dimana kuat tekan beton pada 7 hari pertama belum ada yang memenuhi standar ASTM. Semen akan mengalami hidrasi $<50\%$ selama 3 hari pertama, sehingga pozzolan akan mengalami aktivitas pozzolanik pada hari ke 3 setelah proses pencampuran.

Terdapat pengecualian pada zeolit alam Malang ini karena kandungan CaO dari zeolit alam Malang yang tinggi, yaitu $\text{CaO} > 10\%$ maka selain memiliki aktivitas pozzolanik, zeolit alam Malang juga memiliki aktivitas hidrolik. Aktivitas hidrolik merupakan reaksi antara CaO dari zeolit dengan air membentuk CH sebagai hasil hidrasi. Namun, aktivitas pozzolanik memiliki kecepatan reaksi yang lebih rendah dari pada aktivitas hidrolik sehingga zeolit ini akan lebih banyak menghasilkan CH (aktivitas hidrolik) diawal reaksi daripada mengkonsumsi CH (aktivitas pozzolanik), hal ini menjadi salah satu penyebab rendahnya kekuatan beton di 7 hari pertama (Fan dkk., 2015). Selain itu terjadi reaksi yang lebih kompleks akibat banyaknya reaktan yang terlibat dalam sistem uji SAI seperti semen dan pasir yang dapat menghambat aktivitas pozzolanik seperti adanya kompetisi reaksi antara Ca^{2+} dengan spesies Al dari pasir yang akan menghasilkan C-A-H namun kemampuan C-A-H terhadap kuat tekan beton lebih rendah daripada C-S-H hasil reaksi antara Ca^{2+} dengan spesies Si dari zeolit.