

Substitusi Material Pozolan Terhadap Semen pada Kinerja Campuran Semen

Joice Elfrida Waani

Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi, E-mail: joicewaani@yahoo.com

Lintong Elisabeth

Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi, E-mail: meikeelisabeth@yahoo.co.id

Abstrak

Penggunaan material semen dalam industri konstruksi terus meningkat dari tahun ke tahun dan peningkatan ini berakibat pada meningkatnya produksi gas buangan, CO_2 di alam yang berakibat pada pembentukan efek rumah kaca. Dalam rangka mengeliminasi pengaruh buruk terhadap lingkungan yang diakibatkan oleh teknologi maupun penggunaan material yang tidak ramah lingkungan, para ahli dibidang rekayasa konstruksi terus berupaya untuk menemukan teknologi dan material alternatif yang dapat menghasilkan material konstruksi yang ramah lingkungan tanpa mengurangi kinerja strukturalnya. Penggunaan teknologi daur ulang perkerasan jalan dengan penambahan material alternatif pengganti semen pada konstruksi perkerasan jalan, merupakan upaya positif dalam rangka mendorong penggunaan teknologi dan material yang ramah lingkungan dibidang konstruksi bangunan teknik sipil. Material pozolan yang berupa material hasil buangan industri batu bara maupun bahan pertanian atau material pozolan alam adalah material yang dapat digunakan sebagai bahan pengganti semen karena sifatnya yang menyerupai semen jika ditambahkan pada campuran semen. Penggunaan material ini sebagai material pengganti atau substitusi semen dalam campuran beton menunjukkan peningkatan workabilitas dan kinerja campuran baik pada campuran beton mutu tinggi maupun pada campuran semen dengan kekuatan rendah (low strength materials). Artikel ini membahas tentang beberapa hasil penelitian terhadap campuran beton/semen yang sebagian semennya disubstitusi dengan material pozolan yang menunjukkan berbagai keunggulan dari campuran tersebut untuk dapat diaplikasikan sebagai material konstruksi, baik pada campuran beton bermutu tinggi maupun campuran semen dengan kekuatan rendah.

Kata-kata Kunci: Campuran semen, material pozolan, sifat fisik, sifat mekanikal.

Abstract

The use of cement material in the construction industry increase continuously from year to year and this increase results in increased production of exhaust gases, CO_2 in nature which resulted in the formation of the greenhouse effect. In order to eliminate the adverse influence on the environment caused by technology and the use of environmentally unfriendly materials, experts in the field of construction engineering continues the efforts to find technologies and alternative materials that can produce environmentally friendly construction material without reducing its structural performance. The use of recycled technology in pavement construction with alternative materials as cement replacement is a positive effort in order to encourage the use of technologies and environmentally friendly materials in engineering construction. Pozzolanic material in the form of material waste product of the coal industry and agricultural materials or natural pozzolan material is a material that can be used as a cement replacement material because it resembles a cement when added to the cement mixture. The use of this material as a material replacement or substitution of cement in the concrete mixture showed increased workability and performance either of high quality concrete or low strength materials. This article discusses some of the results of research on the cement mixture with the cement partially substituted by means of pozzolanic material showing the superiority of the mixture to be applied as a construction material, either in a mixture of high-quality concrete or cement mixture with a low strength.

Keywords: Cement mixture, pozzolanic material, physical characteristic, mechanical characteristic.

1. Pendahuluan

Konstruksi bangunan baik berupa perumahan, gedung bertingkat, jalan dan jembatan atau berbagai konstruksi bangunan dibidang keteknik sipil lainnya adalah merupakan kebutuhan manusia. Dalam rangka meningkatkan kualitas hidup manusia, konstruksi bangunan terus ditingkatkan baik secara kualitas maupun kuantitas. Peningkatan kualitas konstruksi berjalan seiring dengan meningkatnya mutu material yang digunakan. Semen portland merupakan material pengikat yang telah

digunakan dalam industri konstruksi selama sembilan milenium (Bentur, 2002). Sifat dan bentuknya yang berupa bubuk yang sederhana dan mudah diperoleh serta mudah dalam pengerjaannya, jika dicampurkan dengan air, material filler, dan agregat akan membentuk suatu campuran yang padat serta mudah dibentuk dan jika dibiarkan dalam temperatur ruang akan mengeras dengan sendirinya, namun dewasa ini dampak dari pertimbangan-pertimbangan kelestarian lingkungan telah mempengaruhi penggunaan semen dalam industri konstruksi. Menurut para ahli yang berkecimpung

dalam pengamatan tentang pemanasan global, 7% dari produksi emisi gas CO₂ dialam adalah berasal dari produksi semen dan setiap pengurangan 1 ton produksi semen mengakibatkan pengurangan 1 ton emisi gas Co₂ (Malhotra, 1999) sehingga hal ini telah mendorong para ahli dibidang rekayasa konstruksi bangunan untuk mencari material alternatif pengganti semen.

Penggunaan material limbah industri dan material daur ulang sebagai material pengganti atau substitusi semen dalam campuran semen merupakan bukti adanya peran aktif dari para ahli dibidang rekayasa konstruksi dalam mengimplementasikan apa yang disepakati bersama dalam workshop tentang *Engineering Solutions for Sustainability: Materials and Resources* dimana salah satu kesepakatan yang dihasilkan adalah perlu adanya upaya dari para ahli rekayasa disemua bidang dan disiplin ilmu untuk mengkonsepkan pendidikan kerekayasaan yang berkelanjutan demi menghasilkan produk-produk kerekayasaan yang berkelanjutan (TMS, 2009).

Kecenderungan pada saat ini dan nanti adanya peningkatan penggunaan kombinasi antara portland semen dengan sebagian besar mineral tambahan, berupa material pozolan buatan seperti *slag* dan *fly ash* atau material pozolan alam. Jika ingin mencapai perubahan yang drastis dalam penggunaan material semen, maka satu hal yang harus dipertimbangkan adalah merubah total cara pandang dalam menggunakan material semen untuk kebutuhan pekerjaan struktur konstruksi yaitu dengan cara mengembangkan material dan model konstruksi yang secara drastis dapat mengurangi jumlah penggunaan semen tanpa mengakibatkan pengurangan kinerja struktural (Bentur, 2002 dan ACI report, 2001). Penambahan material pozolan alam pada campuran semen atau beton menunjukkan adanya peningkatan pada kinerja campuran (Yetgin and Çavdar, 2011; Alp, *et al.*, 2009). Artikel ini, bertujuan membahas tentang penggunaan material pozolan sebagai material tambahan atau substitusi terhadap semen pada campuran beton mutu tinggi (*High-Strength and High-Workability Concrete*) maupun campuran semen berkekuatan rendah (*low strength material*) dan campuran daur ulang dimana berbagai penelitian sudah dilakukan terhadap campuran ini dan menunjukkan perbaikan karakteristik, baik fisik maupun mekanikal dalam aplikasinya di laboratorium maupun di lapangan.

2. Sifat Fisik dan Kimia Material Pozolan

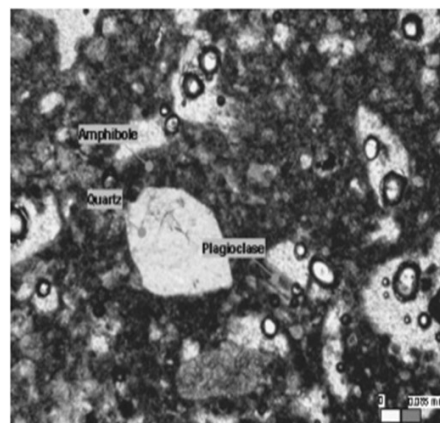
Material pozolan dapat berupa pozolan alam yaitu material yang berasal dari hasil pelapukan abu vulkanik yakni berupa erupsi gunung berapi sedangkan pozolan buatan yaitu material yang berasal dari sisa buangan industri dari material batu bara atau produk sisa pabrikasi bahan pertanian. Material ini mengandung unsur silica dan atau aluminat yang reaktif. Dalam keadaan halus (lolos saringan 0.21 mm) jika ditambahkan pada campuran semen akan bersifat seperti semen melalui proses hidraulik atau aktifitas pozolanik atau keduanya (ASTM, 1993 dan ACI, 2001). Material pozolan dapat dibedakan atas 3 klas yaitu:

1. Klas N, ialah hasil kalsinasi dari pozolan alam seperti tanah diatomice, shale, tuft dan batu apung.
2. Klas F, ialah *fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batu bara jenis antrasit pada suhu 1560 °C.
3. Klas C, adalah hasil pembakaran lignit atau batu bara dengan kadar karbon berkisar 60%. *Fly ash* ini mempunyai sifat seperti semen dengan kadar kapur diatas 10%.

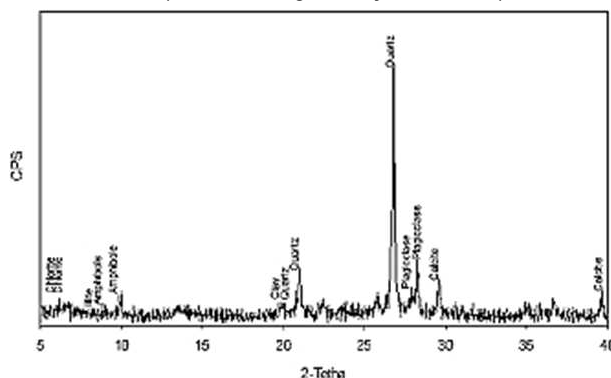
Pozolan alam terbagi atas 4 katagori berdasarkan kandungan kapur reaktif yang terkandung di dalamnya (Mehta, 1987) yaitu:

1. *Unaltered volcanic glass*
2. *Volcanic tuff*
3. *Calcined clay atau shale*
4. *Raw atau calcined opaline silica*

Gambar 1 adalah foto *scanning electronic* dari material pozolan alam asal Turki yang menunjukkan struktur mikro dan mimerologi dari material pozolan alam dan **Gambar 2** adalah foto X-ray dari pozolan alam asal Turki, (Yetgin and Çavdar, 2006).



Gambar 1. Potongan tipis dari pozolan alam (Sumber : Yetgin and Çavdar, 2006)



Gambar 2. XRD dari pozolan alam (Sumber : Yetgin and Çavdar, 2006)

Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia dari tras yang berasal dari Minahasa, Sulawesi Utara dan Tras yang berasal dari Turki (Yetgin and Çavdar, 2006) dimana jenis unsur kimia yang terkandung di dalamnya sama dengan jumlah kandungan yang berbeda.

Tabel 2 adalah standar spesifikasi material pozolan yang harus dipenuhi untuk dapat digunakan sebagai mineral tambahan atau substitusi parsial semen menurut ASTM, 1993. Dari ke dua tabel ini terlihat bahwa tras (pozolan alam) yang berasal dari Turki dan Minahasa (Indonesia) dapat digunakan sebagai material tambahan pada campuran semen atau beton.

Tabel 1. Komposisi kimia tras (natural pozolan-Turki dan Minahasa)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	LOI	Na ₂ O	K ₂ O	Total
Natural Pozolan (Turki)	70,89	9,08	2,96	5,40	0,62	-	7,23	1,11	1,92	99,21
Tras (Minahasa)	69,99	18,61	0,17	7,06	3,16	-		0,21		

Sumber : Yetgin and Çavdar, 2006

Tabel 2. Standard specification for fly ash and pozzolanic materials

	SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Los in ignition (%)	7 th Day Flexural strength (MPa)	7 th Day compressive strength (MPa)
TS 25	>70.00	<5.00	<3.00	<10.00	>1.00	>4.00
Natural Pozolan	82.93	0.62	-	7.23	4.45	11.00

Sumber : ASTM C618-93

Mindess and Young (1981) menyatakan bahwa proses hidrasi semen, yaitu terbentuknya *calcium silicate hydrate* (C₃S₂H₃) adalah sebagai berikut:

1. *Tricalcium silicate* bereaksi dengan air:
 $2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH$
2. *Dicalcium silicate* bereaksi dengan air:
 $2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH$

Calcium silicate hydrate (C₃S₂H₃ atau C-S-H) adalah senyawa yang memperkuat beton, sedangkan kapur mati (CH) adalah senyawa yang poros dan melemahkan beton. Penambahan kandungan silika yang berasal dari material pozolan kedalam campuran semen akan merubah kapur mati (CH) menjadi C₃S₂H₃ (*calcium silicate hydrate*) yaitu senyawa yang dapat memperkuat ikatan antar partikel dalam campuran semen. Pada umumnya material pozolan mengandung unsur-unsur silika, alumina dan besi oksida yang jika bereaksi dengan kalsium hidroksida dan alkali akan membentuk suatu komponen yang kompleks dimana pembentukannya tergantung pada *pozzolanic activity* dari material pozolan. Namun demikian, karena *pozzolanic activity* tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan besarnya kandungan silika, alumina dan besi oksida yang terkandung pada material pozolan, maka perlu adanya pengujian *pozzolanic activity* untuk menentukan *pozzolanic activity index* dari setiap material pozolan yang digunakan.

Material pozolan alam (Tras) banyak terdapat di Indonesia yaitu mengikuti jalur rangkaian gunung api Tersier dan Kuartar antara lain terdapat di beberapa daerah di Aceh, Sumatera, Jambi, Bengkulu, Lampung, Jawa Barat, Jawa Timur, Bali, NTB, NTT, Sulawesi Utara dan Sulawesi

Selatan (<http://miner-padang.blogspot.com/2011/12/bahan-galian-industri-yang-berkaitan.html>)

3. Pengaruh Penambahan atau Substitusi Material Pozolan pada Sifat Fisik dan Kinerja Campuran Beton/Semen

Material pozolan dapat digunakan sebagai material tambahan dalam campuran semen dengan beberapa cara, antara lain langsung mencampurkannya dengan kalsium hidroksida (*Calcium Hydroxide*), namun cara ini sekarang tidak lazim dilakukan lagi. Dapat juga digunakan dengan menambahkannya pada campuran *clinker* halus dan gipsium hingga terbentuk *Portland pozzolan Cements*, atau dapat ditambahkan sebagai material substitusi pada campuran beton, yaitu dengan menambahkan material pozolan pada campuran semen, agregat dan air. Pozolan alam sebagai material yang bersifat piroklastik dapat digunakan sebagai material tambahan pada produksi semen untuk menekan biaya produksi serta meningkatkan kekuatan dan ketahanan campuran semen atau beton sebagaimana dinyatakan oleh Alp, *et al.* (2009). Sujivorakul (2011) menyatakan bahwa Substitusi terhadap semen sebesar 10-20% oleh pozolan buatan yakni *fly ash*, *rice husk ash* atau 10% *palm oil fuel ash* mengakibatkan peningkatan pada *bending strength* dan *strain*, *bending toughness*, dan penyerapan air dari campuran beton dengan fiber glas (*glass fiber-reinforce concrete*). Dengan demikian material ini direkomendasikan untuk dapat digunakan sebagai produk komersil pada konstruksi beton yaitu sebagai material substitusi semen hingga 20% terhadap berat campuran. Beberapa keuntungan dari penggunaan material ini adalah penghematan biaya konstruksi, perbaikan sifat mekanikal campuran dan mengurangi produksi emisi gas buangan Co₂. Jika seluruh penggunaan semen pada proyek konstruksi didunia mengganti penggunaan semen sebesar 25-30% dengan *fly ash* atau material pozolan lainnya, maka akan terjadi pengurangan emisi gas buangan Co₂ sebesar 2%. Hal ini merupakan kontribusi yang besar untuk mencapai kesepakatan *Kyoto protocol* sebagaimana ditetapkan dari PBB, dimana setiap negara anggota harus mengurangi emisi gas buangan Co₂ sekurang-kurangnya 5% dibawah level tahun 1990 pada periode tahun 2008-2012 (https://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php).

Besarnya persentase material pozolan yang dapat ditambahkan dalam campuran bervariasi, tergantung pada *pozzolanic activity* dari material pozolan yang digunakan. Semakin besar *pozzolanic activity index* dari material pozolan semakin berkurang jumlah yang dapat ditambahkan dalam campuran. Namun demikian, jika jumlah material pozolan dalam campuran terlalu sedikit, hal ini akan meningkatkan daya ekspansi dari campuran beton karena adanya reaksi alkali-silika yang terkandung dalam campuran. Oleh karena itu, penentuan besarnya kandungan material pozolan yang dapat digunakan dalam campuran tergantung pada dimana campuran tersebut akan digunakan serta spesifikasinya. Besarnya *Pozzolanic activity index* pada material pozolan ditentukan oleh besarnya kandungan *amorphous silica glass* atau dikenal dengan *active silica*. Pozolan alam banyak mengandung *crystal silica* yaitu mineral yang

sedikit atau bahkan tidak dapat bereaksi dengan kalsium dalam semen dan hanya mengandung sedikit *amorphous silica glass* sedangkan kandungan *amorphous silica glass* pada pozolan buatan lebih besar (ACI committee, 2001). *Pozolanic activity index* dari material pozolan ditentukan oleh besarnya kandungan *active silica* dan juga ditentukan oleh *specific surface area* serta komposisi kimia dan mineralogi.

Pada campuran dengan kadar material agregat halus yang sedikit, terutama material yang lolos saringan no. 200, penggunaan material pozolan dengan gradasi lolos saringan no. 200 sebagai material tambahan dapat mengurangi *bleeding* dan *segregation* dan meningkatkan kakuatan beton melalui substitusi agregat halus (ACI 2001). Jongpradist, *et al.* (2010) menyatakan bahwa, penambahan material pozolan yang dihaluskan (lolos saringan no. 325) dalam campuran semen akan memberikan penyempurnaan pengerasan dari pasta semen yang terbentuk, juga meningkatkan karakteristik mekanisnya. Dengan demikian semakin halus material pozolan yang ditambahkan pada campuran semen semakin besar *specific surface area* yang mengakibatkan semakin besar luas permukaan partikel yang berakibat pada saling mengikatnya partikel dalam campuran, sehingga meningkatkan kinerja campuran. Hal ini, juga disebabkan karena meningkatnya *Specific surface* dan berkurangnya pori pada partikel material pozolan akibat proses penghancuran.

Pada umumnya, material pozolan menghasilkan campuran yang kohesif yang dapat mempertahankan sifat plastis dari campuran sehingga meningkatkan workabilitas campuran. Material ini juga bersifat menyerap air dari campuran dan menyimpannya untuk kebutuhan pada saat *curing time* (Sujivorakul, 2011).

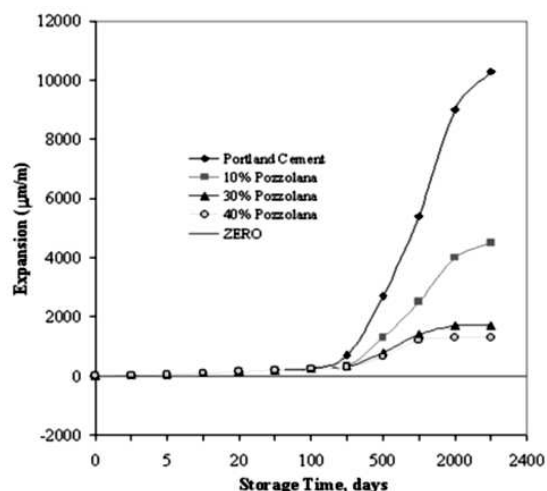
Untuk memproduksi campuran beton yang tahan terhadap gesekan dan benturan seperti campuran yang diaplikasikan pada lapis permukaan perkerasan jalan, dibutuhkan material agregat dengan permukaan yang keras dan memiliki porositas yang rendah. Porositas yang rendah akan mengakibatkan penggunaan air yang sedikit dan campuran menjadi padat, sehingga ratio perbandingan penggunaan air dan semen (w/c) dalam campuran menjadi kecil. Disamping itu untuk menghasilkan beton berkekuatan tinggi, pengurangan *micro cracking* serta zona transisi yaitu *interface* antara pasta semen dan agregat dalam campuran perlu dilakukan. Hal ini dapat diperoleh dengan menggunakan *superplasticizer* atau dengan menambahkan material pozolan pada campuran beton (Shannag, 2000). Sejalan dengan yang dinyatakan oleh Cheng, *et al.* (2008) bahwa jika w/c menurun, porositas menurun dan mengakibatkan peningkatan *Unconfined Compressive Strength* dari campuran.

Selain itu, beberapa keunggulan dari campuran beton yang mengandung material pozolan adalah antara lain, memiliki permeabilitas rendah, mengurangi panas selama proses hidrasi, mengurangi kemungkinan adanya reaksi alkali silika, kekuatan yang meningkat setelah bertambahnya umur beton dan meningkatkan ketahanan

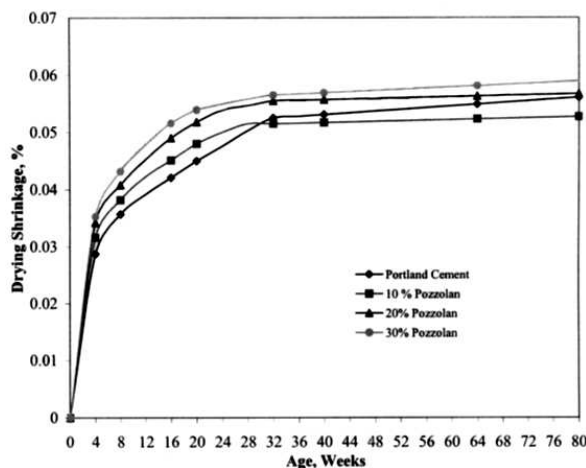
terhadap pengaruh sulfat yang berasal dari air laut (Ferraris, 1995; Malvar, *et al.*, 2002).

Pada campuran daur ulang material perkerasan jalan, substitusi material pozolan terhadap semen pada campuran *Cement Treated Recycled Base (CTRB)* untuk lapis pondasi perkerasan jalan menunjukkan bahwa penurunan porositas karena adanya substitusi pozolan alam terhadap semen berakibat pada peningkatan kuat tekan campuran (UCS) (Waani, *et al.*, 2014).

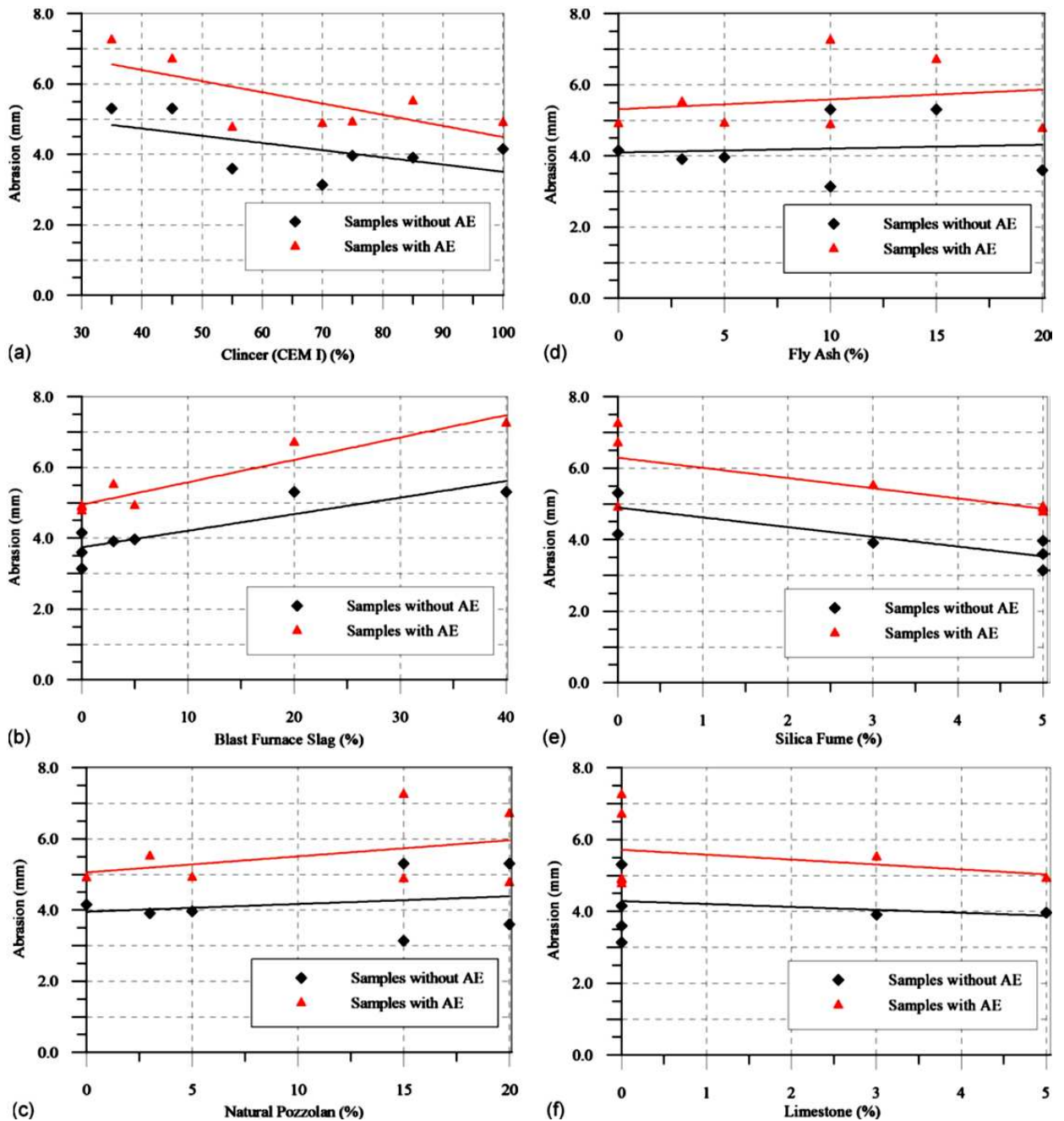
Gambar 3 menunjukkan pengaruh dari substitusi pozolan alam yang berasal dari Italia dalam campuran semen yang berakibat pada penurunan rongga dalam campuran yang memperlihatkan menurunnya sifat ekspansi campuran pada substitusi pozolan alam sebesar 30-40% menurut Massazza and Costa (1979) **Gambar 4** hasil pengujian dari Mehta (1987) yang menunjukkan berkurangnya susut dari campuran seiring bertambahnya umur campuran karena adanya penambahan material pozolan, sebagaimana juga dinyatakan oleh Alp, *et al.* (2009).



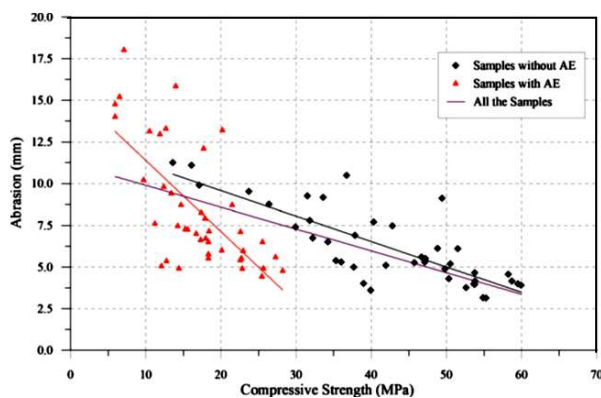
Gambar 3. Hubungan antara *curing time* dengan sifat ekspansi campuran yg mengandung material pozolan dan tanpa kandungan pozolan (Sumber : Massazza and Costa, 1979)



Gambar 4. Susut saat pengeringan dari prisma beton yang terbuat dari campuran semen dan beberapa variasi tanah Santorin (Sumber : Mehta, 1981)



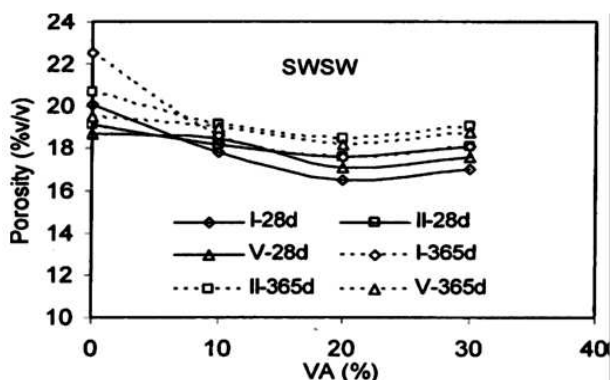
Gambar 5. Hubungan antara kedalaman abrasi dan kandungan material pozolan (Sumber : Yetgin & Çavdar, 2011)



Gambar 6. Hubungan antara kedalaman abrasi dan *compressive strength* (Sumber : Yetgin & Çavdar, 2011)

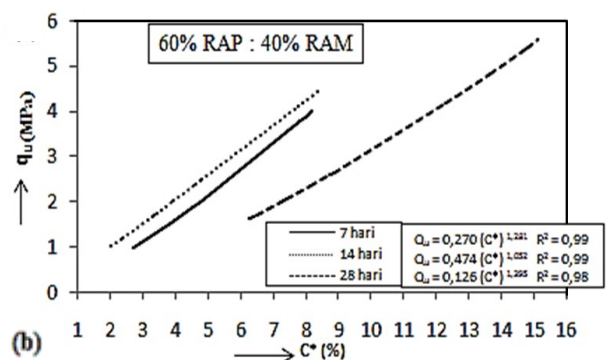
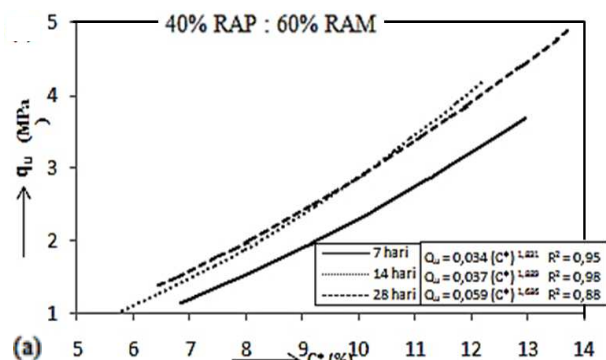
Sedangkan **Gambar 5** dan **Gambar 6** menunjukkan hubungan antara material pozolan dengan besarnya Abrasi yang terjadi, dimana bertambahnya kandungan *clinker*, *silika fume* dan *limestone* mengakibatkan peningkatan ketahanan campuran terhadap abrasi yang pada akhirnya meningkatkan kekuatan tekan campuran. Sebaliknya penambahan persentase pozolan alam, *blast furnace slag* dan *fly ash* mengakibatkan penurunan ketahanan campuran terhadap abrasi. Hal ini disebabkan karena kandungan komponen atau unsur-unsur kimia dalam material pozolan yaitu CaO, SiO₂ dan Al₂O₃ dimana besarnya kandungan CaO dalam pozolan alam, *blast furnace slag* dan *fly ash* mengakibatkan penurunan ketahanan campuran terhadap abrasi karena adanya proses hidrasi semen sedangkan kandungan besarnya SiO₂ dan Al₂O₃ dalam *clinker*, *silika fume* dan

limestone mengakibatkan meningkatnya ketahanan campuran terhadap abrasi. Untuk itu perlu menjadi perhatian bahwa penggunaan pozolan alam atau pozolan buatan dalam campuran semen/beton perlu disesuaikan dengan fungsi dan peruntukan dari campuran tersebut.



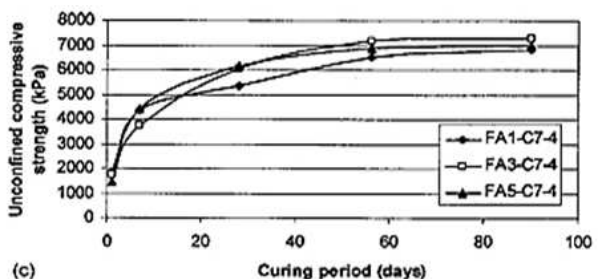
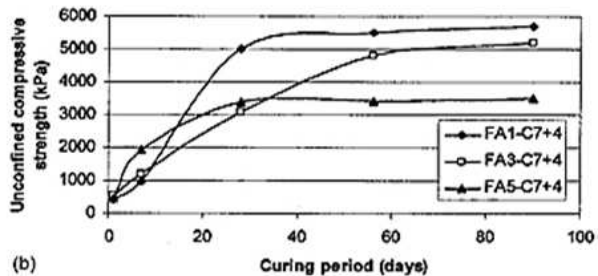
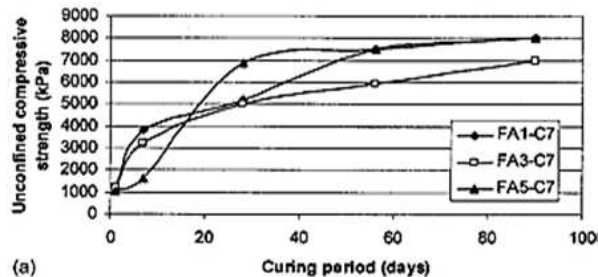
Gambar 7. Pengaruh dari kandungan abu vulkanik (posolan alam), umur dan jenis semen terhadap porositas (Sumber : Khandaker & Hossain, 2005)

Gambar 7 memperlihatkan hubungan antara porositas campuran dengan kandungan material pozolan alam (VA) dalam beberapa variasi, dimana porositas menurun karena adanya penambahan material pozolan terutama pada penambahan rentang 20-30%.



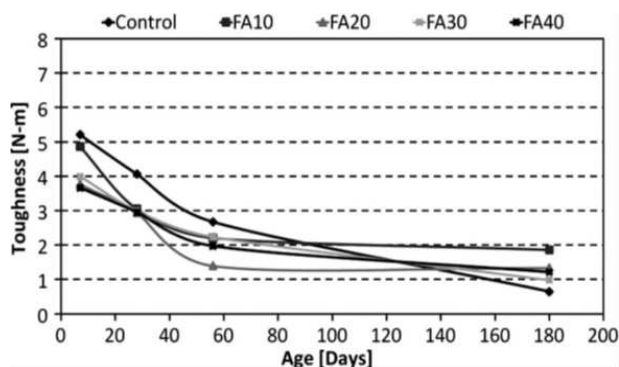
Gambar 8. Grafik hubungan antara q_u dengan kadar material semen (C^*) (Sumber : Waani, et al., 2014)

Gambar 8 memperlihatkan grafik hubungan antara unconfined compressive strength (q_u) dengan kadar material semen (semen + pozolan) yang menunjukkan terjadi peningkatan UCS karena adanya peningkatan kadar material semen serta curing time dari campuran Cement Treated Recycled Base.



Gambar 9. Hubungan antara UCS dengan curing time dari campuran beton dengan variasi agregat halus (Sumber : Arora and Aydilek, 2005)

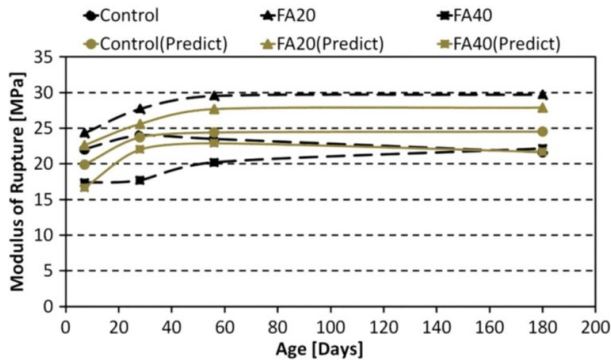
Gambar 9 menunjukkan hubungan antara UCS dengan curing time pada campuran beton, dimana terlihat bahwa UCS meningkat seiring bertambahnya umur campuran.



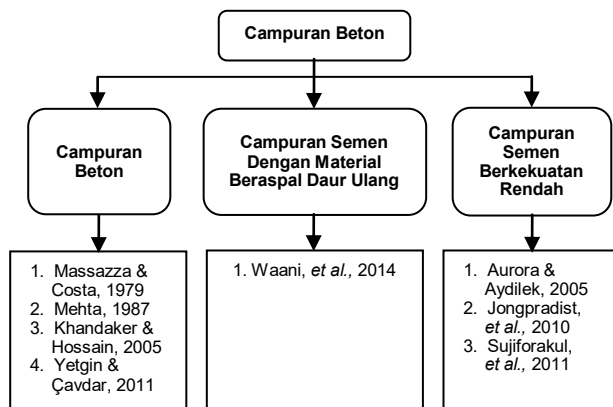
Gambar 10. Pengaruh penuaan terhadap kekuatan campuran (panel GFRC) dengan variasi substitusi agregat halus (fly ash) (Sumber : Sujivorakul, et al., 2011)

Gambar 10 adalah hubungan pengaruh penuaan (umur campuran) terhadap kekerasan panel glass-fiber reinforce concrete (GFRC) yang mengandung fly ash dalam beberapa variasi, dimana dengan bertambahnya umur campuran, kekerasan panel GFRC semakin menurun tetapi pada umur > 140 hari, kekerasan dari campuran yang mengandung fly ash (FA) 20%, 30% dan 40% sedikit lebih tinggi dari pada campuran yang tidak mengandung fly ash. Hal ini sejalan dengan apa

yang ditunjukkan oleh **Gambar 11** dimana peningkatan Modulus Rupture dari campuran yang mengandung FA 20% dan 40% tinggi dari campuran yang tidak mengandung FA (control) terutama pada umur diatas 60 hari.



Gambar 11. Hubungan antara modulus rupture dan umur campuran (Sumber : Sujivorakul, et al., 2011)



Gambar 12. Bagan hubungan antar penelitian

4. Spesifikasi dan Pengujian Campuran Semen dengan Penambahan atau Disubstitusi Pozolan

Beberapa pengujian yang digunakan untuk menentukan kelayakan dari material pozolan agar dapat digunakan sebagai material tambahan atau substitusi pada campuran semen dan beton antara lain adalah :

1. ASTM C 311-96a. "Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete".
2. ASTM, 93. "Standart Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozolan for Use as a Mineral Admixtures in Portland Cement Concrete" ASTM C 618-93.
3. ASTM C 618. "Standar Water requirement of the mortar, Soundness, Uniformity limits, Increase in drying shrinkage of mortar bars dried 28 days".
4. ASTM C 441 Standart Specificationfor Reactivity with cement alkalis.
5. ASTM C 1012 Standart Specification for Sulfate expansion.

6. ASTM C109/M-99 (ASTM 1995) Standar pengujian untuk kuat tekan campuran mortar.
7. ASTM C 227 (1997), "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregates Combinations (Mortar-Bar Method)," American Society for Testing and Materials.
8. ASTM C 289 (1997), "Standard Test Method for Potential Alkali Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)," American Society for Testing and Materials.
9. ASTM D 698 Standar pengujian untuk pemadatan standard Proctor dan ASTM D 1557 standar pengujian untuk pengujian pemadatan modified Proctor .

5. Aplikasi Penggunaan Campuran Semen-Pozolan pada Konstruksi Beton dan Campuran Semen

Aplikasi penggunaan material pozolan sebagai bahan tambahan atau substitusi terhadap semen untuk konstruksi beton antara lain dapat dilakukan pada beberapa jenis konstruksi sebagai berikut: Beton berkekuatan tinggi antara lain beton pratekan, beton masa, konstruksi beton untuk bangunan pantai. Dapat juga ditambahkan pada campuran semen berkekuatan rendah antara lain campuran untuk stabilisasi tanah, campuran semen untuk perkerasan jalan dan campuran beton-fiber glass disamping itu, disamping itu substitusi material pozolan dapat juga diaplikasikan pada campuran semen dengan material daur ulang seperti *cement treated recycled base* baik yang mengandung material agregat saja (RAM) maupun yang mengandung agregat terbungkus aspal (RAP).

6. Kesimpulan

Material pozolan dapat digunakan sebagai material tambahan atau substitusi pada campuran beton dalam rangka menurunkan biaya produksi bangunan, juga dapat langsung digunakan sebagai bahan tambahan pada produksi semen sehingga mengurangi biaya produksi. Beberapa penelitian yang sudah dilakukan terhadap campuran semen dan beton dengan penambahan atau substitusi material pozolan terhadap semen untuk berbagai jenis konstruksi, menunjukkan adanya peningkatan baik pada sifat-sifat fisik maupun pada kinerja campuran, yaitu :

1. Berkurangnya susut saat proses pengeringan yang bisa mengakibatkan keretakan.
2. Berkurangnya sifat ekspansif campuran.
3. Berkurangnya pori dalam campuran yang mengakibatkan menurunnya permeabilitas campuran.
4. Dapat mengurangi kebutuhan air dalam campuran.
5. Pencapaian kekuatan campuran yang besar seiring bertambahnya umur campuran.
6. Meningkatkan ketahanan campuran terhadap abrasi (pozolan buatan).

7. Kinerja struktural yang baik bila diaplikasikan pada konstruksi yang berhubungan dengan air laut.
8. Meningkatkan workabilitas campuran.
9. Mengurangi produksi gas CO₂ di dalam yang berakibat pada efek rumah kaca.
10. Sebagai material yang mencegah reaksi Alkali-Silika.
11. Mengurangi biaya konstruksi.

Dengan adanya berbagai manfaat serta keunggulan dari campuran semen atau beton yang disubstitusi atau ditambahkan material pozolan, maka material pozolan dapat menjadi bahan tambahan/substitusi terhadap sebagian semen pada campuran semen untuk berbagai konstruksi bangunan teknik sipil.

Singkatan dan notasi

AE	=	air entraining agent
ASTM	=	american society for testing and material
SWSW	=	sea water
UCS	=	unconfined compressive strength
VA	=	volcanic ash
XRD	=	x-ray diffractometer
q _u	=	UCS

Daftar Pustaka

- ACI 232.1R-00, 2001, *Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete Reported by ACI Committee 232* ACI 211.1
- Alp, I., Deveci, H., Sungun, Y.H., Yilmaz, A.O., Kesimal, A., and Yilmaz, E., 2009, Pozzolan Characteristic of Natural Raw Material for Use in Blended Cements, *Iranian Journal of Science & Technology*, Transaction B, Engineering, Vol. 33, No. B4, pp 291-300.
- Arora, S. M. ASCE and Aydilek, A.H. M. ASCE., 2005, Class F Fly-Ash-Amended Soils as highway Base Materials, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 6 ASCE, ISSN 0899-1561/2005/6-640-649.
- ASTM, 1993, *Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixtures in Portland Cement Concrete*, ASTM C 618-93.
- ASTM C 311-96a, *Standard Test Method for Sampling and Testing Fly Ash or natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete*.
- ASTM C 618, *Standard Water requirement of the mortar, Soundness, Uniformity limits, Increase in drying shrinkage of mortar bars dried 28 days*.
- ASTM C 441, *Standard Specification for Reactivity with cement alkalies*.
- ASTM C 1012, *Standard Specification for Sulfate expansion*.
- ASTM C109/M-99 (ASTM, 1995), Standar pengujian untuk kuat tekan campuran mortar.
- ASTM C 227, 1997, *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Cement-Aggregates Combinations (Mortar-Bar Method)*, American Society for Testing and Materials.
- ASTM C 289, 1997, *Standard Test Method for Potential Alkali Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)*, American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 698, Standar pengujian untuk pemadatan standar Proctor.
- ASTM D 1557, Standar pengujian untuk pengujian pemadatan modified Proctor.
- Bentur, A., 2002, Cementitious Materials-Nine Millennia and A New Century: Past, Present, and Future, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 14, No. 1, ASCE, /1-2-22.
- Cheng, A.S., Yen, T., Liu, Y.W., and Sheen, Y.N., 2008, *Relation Between Porosity and Compressive Strength of Slag Concrete*, ASCE Download from ASCE library.org.
- Ferraris, C.F., 1995, *Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete*, Building and Fire Research Laboratory National Institute of standards and technology Gaithersburg, (NISTIR) 5742.
- <http://miner-padang.blogspot.com/2011/12/bahan-galian-industri-yang-berkaitan.html>
- https://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php "Kyoto Protocol"
- Jongpradist, P., Jumlongrach, N., Youwai, S., and Chucheepsakul, S., 2010, Influence of Fly Ash on Unconfined Compressive Strength of Cement-Admixed Clay at High Water Content, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 22, No. 1, ASCE, ISSN 0899-1561/2010/1-49-58.
- Khandaker, & Hossain., 2005, Performance of Volcanic Ash Based Precast and In Situ Blended Cement Concretes in Marine Environment, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 6, ISSN 0899-1561.
- Malhotra, V.M., 1999, Making Concrete Greener with Fly Ash, *Concrete International*, Vol. 21, No. 5, pp. 61-66.

- Malvar, L.J., Cline, G.D., Burke, D.F., Rollings, R., Sherman, T.W., Greene, J., 2002, Alkali-Silica Reaction Mitigation: State – of – the - Art and Recommendation, *American Cement Institute Materials Journal*, Vol. 99, No. 5.
- Massazza, and Costa., 1979, *Aspects of the Pozzolanic Activity and Properties of pozzolanic Cements*, II Cemento 76: 3-18, Jan.-Mar.
- Mehta, P.K., 1981, Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin-Earth, *Cement and Concrete Research*, V. 11, pp. 507-518.
- Mindess, and Young., 1981, *Concrete*, Prentice-Hall, Inc. EngleWood Cliffs, N.J. 07632
- Shannag, M.J., 2000, High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume, *Cem. Concr. Compos.*, 22, 399–406.
- Sujivorakul, C., Jaturapitakkul, C., and Taotip, A., 2011, Utilization of Fly Ash, Rice Husk Ash, and Palm Oil Fuel Ash in Glass Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 9, ISSN 0899-1561/2011/9-1281–1288.
- Tanudjaja, H., Sugiri, S.M., dan Khosama, L.K., 2000, *Beton dengan Batu Andesit sebagai Agregat Kasar dan Tras Halus sebagai Substitusi Parsial Semen*, Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi.
- TMS, The Minerals, Metals & Materials Society, 2009, *Engineering Solutions for Sustainability Materials and Resources*, New York: A John Wiley & Sons, Inc.
- Waani, *et al.*, 2014, Influence of Natural Pozzolan on Porosity-Cementitious Materials Ratio in Controlling the Strength of Cement Treated Recycled Base Pavement Mixtures, *International Refereed Journal Of Engineering and Science*. ISSN (Online) 2319-183X. Vol. 3. Issue:11 pp.04-11.
- Yetgin, S., and Çavdar, A., 2006, Study of Effects of Natural Pozzolan on Properties of Cement Mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 6.
- Yetgin & Çavdar, 2011, Abrasion Resistance of Cement Mortar with Different Pozzolanic Compositions and Matrices, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 2, ASCE, ISSN 0899-1561/2011/2-138–145.
- Yetgin, S., and Çavdar, A., 2011, Abrasion Resistance of Cement Mortar with Different Pozzolanic Compositions and Matrices, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 23, No. 2, ISSN 0899-1561/2-138–145.

