

**PENGARUH KEPEKATAN LARUTAN AKTIVATOR TERHADAP KUAT TEKAN
GEOPOLYMER MORTAR BERBAHAN DASAR ABU TERBANG DAN NaOH 12 MOLAR PADA
KONDISI SS/SH 2.0 DAN 4.0**

Estika Fitrianda Intan Permata

Program Studi S1 Teknik Sipil, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
tikaintanpermata19@gmail.com

Arie Wardhono

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
ariewardhono@unesa.ac.id

Abstrak

Ketergantungan penggunaan semen pada bidang konstruksi menyebabkan peningkatan produksi semen *portland* yang berdampak pada kondisi lingkungan. Hal ini dikarenakan selama proses pembakaran bahan baku untuk menghasilkan 1 ton semen melepaskan 1 ton gas CO₂ secara langsung ke udara. Gas tersebut merupakan salah satu gas terbesar yang ikut menyumbang dalam pemanasan global. Karbondioksida (CO₂) memberikan kontribusi 65% terhadap pemanasan global. Dengan demikian salah satu cara mengurangi pemanasan global dimuka bumi ini dan memanfaatkan beton tanpa semen untuk pembangunan infra struktur dengan material beton tanpa semen dan sejalan dengan perkembangan teknologi mutakhir. Pembuatan mortar tanpa semen (*geopolymer*) secara umum dilakukan dengan menggunakan *fly ash* sebagai bahan dasar utamanya. *Fly ash* dikategorikan sebagai limbah yang mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), karena mengandung logam berat seperti Fe, Mn, Zn, dan Cr, sehingga tidak diperkenankan dibuang tanpa pengolahan dahulu. Sebagai bahan pengganti semen, penggunaan *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* dapat menurunkan produksi gas CO₂ yang dihasilkan selama proses produksi semen. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil kuat tekan mortar *geopolymer* berbahan dasar abu terbang dan NaOH 12 molar pada kondisi SS/SH 2.0 dan 4.0 dan untuk mendapatkan standar optimum penambahan *fly ash* pada pembuatan mortar tanpa semen menggunakan NaOH 12 molar pada kondisi SS/SH 2.0 dan 4.0 dengan menggunakan nilai w/s sebesar 0,2; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kadar solid larutan aktivator (W/S) dapat mempengaruhi kuat tekan mortar *geopolymer*. Hasil kuat tekan mortar kondisi SS/SH = 2 meningkat dari nilai variasi w/s = 0,20 hingga mencapai puncaknya pada nilai variasi W/S = 0,30 mampu mencapai nilai 59,12 MPa, sedangkan mortar kondisi SS/SH = 4 menunjukan kenaikan yang sama hingga mencapai puncaknya pada nilai variasi W/S = 0,30 dengan nilai kuat tekan 35,63 MPa. Setelah nilai W/S telah lebih dari 0,30, maka kuat tekannya menurun. Maka diperoleh bahwa kadar solid larutan aktivator (W/S) yang optimum pada kondisi SS/SH = 2 dan 4 adalah 0,30.

Kata kunci : Mortar *Geopolymer*, *Fly Ash*, Rasio W/S, Molaritas, SS/SH, Kuat Tekan, Suhu Ruangan

Abstract

The dependency on the use of cement in the construction sector had led to an increase in portland cement production which affecting on environmental conditions. This happened because during the burning process of raw materials producing 1 ton of cement, it released 1 ton of CO₂ directly into the air. Carbon dioxide (CO₂) is one of the biggest gases that contributes, namely 65%, to global warming. Thus, one way to reduce global warming on this earth in line with the development of the latest technology, is to use concrete without cement for infrastructure development. Mortar making without cement (*geopolymer*) is generally done using *fly ash* as the main ingredient. *Fly ash* is categorized as waste containing Hazardous and Toxic Materials (B3), because it contains heavy metals such as Fe, Mn, Zn, and Cr, so it is forbidden to dispose without prior treatment. As a substitute for cement, the use of *geopolymer* made from *fly ash* can reduce the gas production of CO₂ during the cement production process. The purpose of this study was to obtain the compressive strength results of *geopolymer* mortar made from *fly ash* and 12 M NaOH SS/SH = 2.0 and 4.0 and to obtain the optimum standard of *fly ash* addition in making mortar without cement using 12 M NaOH, SS/SH = 2.0 and 4.0 with the value of 0.2; 0.25; 0.30; 0.35; 0.40; 0.45 W/S. The results of this study showed that the solid levels of the activator solution (W/S) can affect the compressive strength of *geopolymer* mortar.

The results of the mortar compressive strength in SS/SH = 2 increased from the variation value of W/S = 0.20 until it reached its peak in the variation value of W/S = 0.30 achieving the value of 59.12 MPa, while the mortar in SS/SH = 4 showed the same raise until it reached its peak in the variation value of W/S = 0.30 with the compressive strength of 35.63 MPa. After W/S value reached more than 0.30, the compressive strength decreased. As a conclusion, the optimum level of activator solution (W/S) in SS/SH = 2 and 4 was 0.30.

Keywords : Geopolymer Mortar, Fly Ash, Water Solid Ratio (w/s ratio), Molarity, Sodium Silicate to Sodium Hidroxide Ratio (SS/SH ratio), Compressive Strength, Room Temperature.

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Ketergantungan penggunaan semen pada bidang konstruksi menyebabkan peningkatan produksi semen portland yang berdampak pada kondisi lingkungan. Hal ini dikarenakan selama proses pembakaran bahan baku untuk menghasilkan 1 ton semen melepaskan 1 ton gas CO₂ secara langsung ke udara (Basuki, 2012). Abu terbang (*fly ash*) dikategorikan sebagai limbah yang mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3), karena mengandung logam berat seperti Fe, Mn, Zn, dan Cr, sehingga tidak diperkenankan dibuang tanpa pengolahan dahulu (Bankowski dkk, 2004). Salah satu cara yang telah diperkenalkan para peneliti untuk mereduksi peran bahaya logam berat tersebut adalah dengan mengkonversi abu terbang (*fly ash*) ke bentuk *geopolymer* (Van Jaarsveld dkk, 2002). Sebagai bahan pengganti semen, penggunaan *geopolymer* berbahan dasar abu terbang (*fly ash*) dapat menurunkan produksi gas CO₂ yang dihasilkan selama proses produksi semen (Davidovits 1994).

Pembuatan mortar tanpa semen (*geopolymer*) secara umum dilakukan dengan menggunakan abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan dasar utamanya. Mortar *geopolymer* ini terbentuk dari reaksi kimia bukan dari reaksi hidrasi seperti pada mortar konvensional biasa. Bahan baku beton akhir-akhir ini menjadi polemik. Salah satu bahan baku pada beton yaitu semen sering dianggap sebagai bahan yang mencemari lingkungan. Menurut *International Energy Authority, World Energy Outlook*, jumlah CO₂ yang dilepaskan pada saat produksi semen mencapai 7% dari keseluruhan CO₂ yang dihasilkan berbagai sumber. Mortar konvensional

yang menggunakan semen portland akan memperbanyak produksi semen yang mengakibatkan banyaknya gas CO₂ ke atmosfer bumi, karena setiap 1 ton produksi semen akan menghasilkan 1 ton gas CO₂, gas tersebut merupakan salah satu gas terbesar yang ikut menyumbang dalam pemanasan global. Karbondioksida (CO₂) memberikan kontribusi 65% terhadap pemanasan global (McCaffrey 2002; Ariffin et al, 2011). Dengan demikian salah satu cara mengurangi pemanasan global dimuka bumi ini dan memanfaatkan beton tanpa semen untuk pembangunan infra struktur dengan material beton tanpa semen dan sejalan dengan perkembangan teknologi mutakhir.

Penerapan beton *geopolymer* dalam bidang konstruksi dapat menjadi salah satu upaya diperolehnya beton baru yang ramah lingkungan. Untuk mengetahui komposisi *fly ash* dan larutan aktivator pada campuran beton, dapat dilakukan dengan pengujian campuran mortar. Belum banyaknya penelitian mengenai campuran beton *geopolymer* menyebabkan belum adanya *mix design* yang dapat digunakan dengan baik. Komposisi *fly ash* dan larutan aktivator pada campuran mortar *geopolymer* akan diteliti sehingga didapatkan *mix design* dengan kekuatan yang optimum dan memiliki kinerja yang baik.

Pada proses geopolimerisasi larutan alkalin yang sering digunakan merupakan kombinasi *Sodium Hidroksida* (NaOH) atau *Potassium Hidroksida* (KOH) dan *Sodium Silikat* (Na₂SiO₃) atau *Potassium Silikat* (K₂SiO₃). Jenis larutan alkali berperan penting dalam proses polimerisasi. Reaksi lebih cepat terjadi jika mengandung silikat disbanding hidroksida. Adapun larutan NaOH memberikan reaksi yang lebih baik disbanding larutan KOH. Penggunaan bahan *Sodium* (Na) yaitu sodium hidroksida atau

sodium silikat akan lebih murah sehingga biaya dapat ditekan dan teknologi yang digunakan lebih *feasible* (Hardjito dan Rangan, 2005).

Dari komposisi penelitian di atas, akan diteliti lagi komposisi mana yang memiliki kuat tekan yang paling tinggi dan juga akan diamati perilaku fisik dan mekanik beton terhadap molaritas dan perbandingan kadar aktivator yang digunakan dalam penelitian ini. Dengan adanya penelitian ini diharapkan akan diperoleh suatu jenis beton baru yang ramah lingkungan (Davidovits, 1999), karena dapat memanfaatkan material sisa (buangan) sehingga mengurangi limbah yang mencemari lingkungan, serta mengurangi kadar emisi CO₂ yang dihasilkan oleh produksi semen.

Penelitian mengenai beton *geopolymer* ini sangat sedikit dilakukan di Indonesia. Oleh sebab itu, penelitian mengenai beton *geopolymer* ini perlu dilakukan. Keberhasilan penelitian ini diharapkan bisa menambah wawasan masyarakat mengenai beton *geopolymer* sebagai beton alternative.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas adanya rumusan masalah yang dapat diambil sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kepekatan larutan aktivator terhadap kuat tekan *geopolymer* mortar berbahan dasar abu terbang dan NaOH 12 molar pada kondisi SS/SH 2,0 dan 4,0?
2. Berapa standar optimum penambahan w/s pada pembuatan mortar tanpa semen menggunakan NaOH 12 molar pada kondisi SS/SH 2,0 dan 4,0?

C. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Menggunakan mutu beton f'_c 19,3 MPa (K225).
2. Cairan *alkaline activator* yang digunakan yaitu kombinasi cairan Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na₂SiO₃).
3. Molaritas NaOH yang digunakan sebesar 12M.
4. Perbandingan *ratio water solid* w/s adalah 0,2–0,45.
5. Menggunakan abu terbang (*fly ash*) tipe C.

6. Benda uji yang digunakan berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm³ dengan benda uji 108 buah mortar kubus dengan 9 variasi yang masing-masing berjumlah 3 sampel dengan pengujian kuat tekan. Pengujian mortar dilakukan pada umur 7, 14, dan 28 hari.

D. Manfaat Penelitian

Diharapkan dalam penelitian ini dapat diperoleh manfaat:

1. Manfaat Teoritis
 - a. Memberikan pengetahuan tentang mortar *geopolymer* terutama variasi abu terbang (*fly ash*) sebagai bahan agregat halus pembuatan mortar *geopolymer*.
 - b. Bagi kalangan akademisi diharapkan dapat menumbuhkan dan memperkaya inovasi terhadap pemanfaatan limbah *fly ash* secara maksimal. Hal ini juga menjadi dasar untuk dilakukan penelitian lanjutan pada beton mutu tinggi dan beton untuk struktur.
 - c. Memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu bahan dan struktur.
2. Manfaat Praktis
 - a. Menambah alternatif bahan penyusun mortar *geopolymer* sebagai bahan tambah agregat halus yang berfungsi mengatasi proses pengerasan yang lambat.
 - b. Mengurangi penyebab kerusakan lingkungan dengan memberi solusi terhadap polusi udara sebagai akibat industri pembuatan semen.
 - c. Hasil penelitian ini diharapkan dapat diinformasikan dan disebarluaskan sehingga dapat dimanfaatkan dan digunakan oleh praktisi.

KAJIAN PUSTAKA

A. Pengertian Beton

Menurut SNI-03-2847-2002, pengertian beton adalah campuran antara semen *portland* atau semen hydraulic lainnya, agregat kasar, agregat halus, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk masa padat. Beton disusun dari agregat kasar dan agregat halus. Agregat halus yang digunakan biasanya adalah pasir alam maupun pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu, sedangkan agregat kasar yang dipakai biasanya berupa batu alam maupun

batuan yang dihasilkan oleh industri pemecah batu.

Beton merupakan salah satu jenis konstruksi yang paling banyak digunakan dalam dunia konstruksi. Semen *portland* merupakan bahan yang paling penting digunakan dalam pembuatan beton konvensional. Pembangunan infrastruktur yang semakin hari semakin meningkat mengakibatkan permintaan jumlah semen yang meningkat pula. Akan tetapi, pada saat proses memproduksi semen, terjadi pula emisi CO₂ ke udara yang besarnya sebanding dengan jumlah semen yang diproduksi. Dengan kata lain, memproduksi 1 ton semen sama dengan memproduksi 1 ton CO₂ ke dalam udara (Davidovits,1994).

B. Pengertian Mortar

Mortar adalah suatu campuran yang terdiri dari semen, agregat halus dan air baik dalam keadaan dikeraskan ataupun tidak dikeraskan (SNI 15-2049-2004). Adapun macam mortar adalah:

1. Mortar lumpur (*mud mortar*) yaitu mortar dengan bahan perekat tanah.
2. Mortar kapur yaitu mortar dengan bahan perekat kapur.
3. Mortar semen yaitu mortar dengan bahan perekat semen.

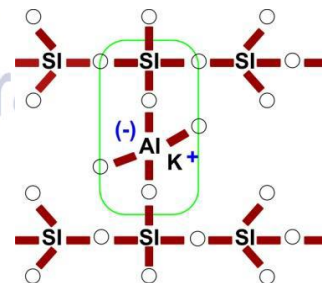
Sedangkan *geopolymer* merupakan bahan anorganik yang dikembangkan oleh Davidovits, seorang ilmuwan Perancis. Pada tahun 1978, Davidovits mengemukakan bahwa larutan alkali dapat digunakan untuk mereaksikan *Silicon* (Si) dan *Aluminium* (Al) yang terdapat pada sumber material alami atau buangan hasil sampingan industri seperti abu terbang menjadi sebuah binder, yaitu suatu bahan yang memiliki sifat seperti semen. Komposisi kimia material *geopolymer* serupa dengan *Zelolit*, tetapi memiliki *mikrostruktur amorphous* (Davidovits, 1999). Selama proses sintesa, atom Silika dan Alumina menyatu dan membentuk blok yang secara kimia memiliki struktur yang mirip dengan batuan alam.

C. Pengertian Beton Geopolymer

Beton *geopolymer* ini adalah beton yang 100% tidak menggunakan semen. Karena itu digunakan material mengandung banyak oksida

silica dan alumina yang diaktifkan dengan suatu larutan aktifator. Untuk menggantikan semen sebagai perekat agregat kasar maupun halus maka digunakan *fly ash*. *Fly ash* adalah limbah yang berasal dari abu pembakaran batu bara. Proses polimerisasi yang terjadi di dalam beton geopolimer meliputi reaksi kimia yang terjadi antara alkalin dengan mineral Si – Al sehingga menghasilkan rantai *polymeric* tiga – dimensi dan ikatan struktur Si – O – Al – O yang konsisten (Davidovits,1999). Davidovits (1978) menyarankan penggunaan istilah '*poly(sialate)*' sebagai nama kimia dari beton geopolimer yang berbahan dasar *silicon-aluminate*. Sialate adalah singkatan dari *silicon-oxoaluminate*.

Geopolymer mortar adalah mortar dengan bahan pengikat menggunakan geopolimer, yang dapat dibuat dari bahan dasar *fly ash*, *ground granulated blast furnace ash*, dan lain-lain. Pada dasarnya material yang dapat digunakan adalah material yang memiliki kandungan oksida silica dan alumina tinggi. Mortar *geopolymer* dihasilkan dengan sepenuhnya mengganti semen *portland* (PC) dengan *fly ash*. *Fly ash* dipilih sebagai bahan dasar penelitian ini karena kandungan silica dan aluminanya yang tinggi. *Fly ash* yang digunakan harus diaktifkan dengan larutan alkali berupa sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na₂ SiO₃) sebagai katalisatornya untuk meningkatkan reaksi polimerisasi. Reaksi silica dan aluminium dengan alkaline akan menghasilkan SiO dan AlO₄ seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 1. Ikatan Polimerisasi yang terjadi pada Beton *Geopolymer* (Yuwono dan Sanjaya 2006)

D. Penelitian-penelitian Terdahulu

Dalam penelitian *geopolymer* sebelumnya, Palomo,dkk(1999) meneliti beton geopolimer dengan menggunakan bahan *fly ash* kelas F. Ia

menggunakan empat larutan yang berbeda dengan perbandingan massa antara alkali aktivator dan *fly ash* berkisar 0,25 sampai 0,30. Perbandingan molar larutan $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$ atau $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ berkisar antara 0,63 sampai 1,23. Benda uji yang digunakan berukuran 10x10x60 mm. Kuat tekan yang paling tinggi diperoleh setelah melakukan *curing* selama 24 jam pada suhu 65°C yaitu mencapai lebih dari 60 MPa untuk campuran yang menggunakan kombinasi aktivator *sodium hidroksida* dan *sodium silikat*.

Xu dan van Deventer (2000) melakukan penelitian dan melaporkan bahwa perbandingan massa larutan alkali dengan alumino – silikat kira-kira 0,33 agar terjadi reaksi geopolimer. Alkali aktivator akan segera membentuk *gel* yang tebal ketika bercampur dengan *alumino – silikat*. Mereka melakukan penelitian dengan benda uji yang berukuran 20x20x20 mm dan kuat tekan maksimum yang diperoleh mencapai 19 MPa setelah di *curing* selama 72 jam pada suhu 35°C.

Dilain pihak, van Jaarsveld dkk (1998) melakukan penelitian dengan menggunakan perbandingan massa alkali sebesar 0,39. Dalam pekerjaannya, ia menggunakan 57% *fly ash* yang dicampur dengan 15% kaolin. Larutan alkalin terdiri dari 3,5% *sodium silikat*, 20% air dan 4% *sodium* atau *potassium hydroxide*. Benda uji yang digunakan berukuran 50x50x50 mm. Kuat tekan maksimum yang diperoleh mencapai 75 MPa.

Berdasarkan penelitian Davidovits (1982) dengan menggunakan kaolin sebagai sumber material, Barbosa dkk (2000) menyiapkan tujuh komposisi campuran pasta beton geopolimer dengan parbandingan molar berkisar $0,2 < \text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 < 0,48$; $3,3 < \text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 < 4,5$ dan $10 < \text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 25$. Berdasarkan hasil tes terhadap benda uji tersebut, ditemukan bahwa komposisi optimum terjadi pada perbandingan $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2 = 0,25$; perbandingan $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 10,0$ dan perbandingan $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 3,3$. Campuran yang menggunakan kadar air tinggi, misalnya $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 25$, menyebabkan kuat tekan beton geopolimer menjadi rendah.

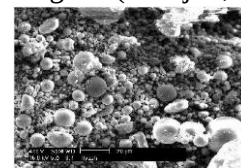
Pada tahun 2005, Hardjito dan Rangan mengadakan penelitian mengenai campuran beton geopolimer. Konsentrasi *sodium hidroksida* (NaOH) yang digunakan berkisar antara 8M–

16M. Perbandingan massa antara *sodium silikat* dan *sodium hidroksida* berkisar antara 0,4 sampai 2,5. Sedangkan perbandingan massa antara alkali aktivator dengan *fly ash* kira-kira 35%. Mereka menyimpulkan bahwa semakin tinggi konsentrasi molaritas *sodium hidroksida* menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan beton geopolimer. Dan semakin tinggi perbandingan massa antara *sodium silikat* dengan *sodium hidroksida* menyebabkan semakin tinggi pula kuat tekan yang dihasilkan oleh beton geopolimer tersebut. Kuat tekan beton geopolimer pada umur tujuh hari mencapai 67 MPa setelah di *curing* selama 24 jam pada suhu 60°C.

E. Material Penyusun Beton Geopolymer

1. Abu Terbang (*Fly Ash*)

Material utama untuk pembentukan geopolimer yang memiliki ikatan alumino-silikate yang kaya akan Silikon (Si) dan aluminium (Al). ini bisa berarti material alam seperti kaolin, dan lampung dimana formula empirisnya mengandung Si, Al, dan Oksigen (Davidovits, 1994), atau material buatan seperti *fly ash*, *silica fume* dan *slag*. Namun, diantara material buatan yang juga merupakan limbah, *fly ash* dan *slag* merupakan material yang paling potensial sebagai bahan dasar beton geopolimer (Hardjito et al, 2005). Abu terbang (*fly ash*) sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen. Tetapi dengan kehadiran air dan ukuran partikelnya yang halus, oksida silikat yang dikandung oleh abu terbang (*fly ash*) akan bereaksi secara kimia dengan *sodium hidroksida* dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat (Hardjito, 2001).



Gambar 2. SEM dari *fly ash* (Hardjito.D.,et.,2001)

Fly ash merupakan material sisa pembakaran batu bara yang kandungan mineral dan kimianya dipengaruhi oleh *design properties* pembuatan batu bara dan

tipe batu bara (*anthracite*, *bituminous*, *sub-bituminous*, dan *lignite*) (Naik, 1993). Oleh karena itu hal ini menyebabkan terjadinya perbedaan pada karakteristik *fly ash* (ukuran partikel, nilai pH, & kandungan kimia). *Fly ash* dapat dibedakan menjadi 3 jenis (ACI *Manual of Concrete Practice* 1993 Part 1 226.3R-3), yaitu:

a. Kelas C

Fly ash yang mengandung CaO lebih dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub-bitumen batu bara (batu bara muda).

- 1) Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 50%
- 2) Kadar CaO mencapai 10%

b. Kelas F

Fly ash yang mengandung CaO lebih kecil dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran anthracite atau bitumen batu bara.

- 1) Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 70%
- 2) Kadar CaO < 5%

c. Kelas N

Pozzolan alam atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain tanah *diatomic*, *opaline chert*, *shales*, *tuff*, dan abu vulkanik, yang mana biasa diproses melalui pembakaran atau tidak melalui proses pembakaran. Selain itu juga mempunyai sifat *pozzolon* yang baik.

Fly ash kelas N dan F memiliki senyawa kimia $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ dan *fly ash* kelas C memiliki senyawa kimia $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 50\%$. Jika dilihat dari hasil tes XRF yang dilakukan oleh Wijaya (2015), maka semakin rendah senyawa $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ pada *fly ash* mengakibatkan semakin tinggi kandungan kalsium (Ca) pada *fly ash* tersebut. Sehingga hal ini membuat *fly ash* kelas C memiliki kandungan kalsium yang lebih tinggi daripada *fly ash* kelas F dan kelas N. Menurut peneliti (Diaz, Allouche, & Eklund, 2010), menyebutkan bahwa kadar kalsium yang semakin tinggi menyebabkan kenaikan *compressive strength* pada *geopolymer*, tetapi menyebabkan *setting* yang lebih cepat sehingga membuat *workability* mortar menjadi rendah.

2. Agregat Halus

Agregat halus adalah agregat yang semua butirannya menembus ayakan berlubang 4,75 mm. agregat halus yang digunakan sebaliknya adalah agregat yang telah memenuhi standar yang berlaku (ASTM C33, 1982).

Tiga jenis agregat yakni ukuran 10 mm, 7 mm, dan pasir digunakan pada beton *geopolymer*. Semua agregat dalam kondisi *saturated surface dry* (SSD), dan disiapkan sesuai dengan Standar Australia AS 1141.5-2000 dan AS 1141.6-2000.

Agregat halus mempunyai persyaratan sifat fisis khusus untuk beton ringan terhadap mutu struktur yang sesuai dengan SNI 03-2461-2002:

1. Berat jenis agregat 1,0-1,8 ton/m³.
2. Penyerapan air maksimum setelah direndam 24 jam adalah 20 %.
3. Berat isi maksimum agregat halus 880 kg/cm³.
4. Nilai presentase volume padat adalah 9-14%.
5. Kadar bahan yang mentah (*clay dump*) adalah < 1%.

3. Air Suling

Menurut kamus Bahasa Indonesia, air suling adalah air yang berasal dari proses *distilasi* (penyulingan). Air suling tidak mengandung senyawa *nonvolatile* (misalnya, berbagai mineral), tetapi dapat mengandung senyawa *organic volatile*. Air suling dibuat menggunakan suatu penyuling, yaitu air biasa dipanaskan sampai mendidih, kemudian uap yang dihasilkan didinginkan dalam pipa pendingin sehingga terkondensasi menghasilkan air suling. pH air suling normal berkisar antara 5,0 dan 5,5 (asam). Air suling digunakan dalam pembuatan reagen dan untuk membilas berbagai peralatan gelas sebelum dikeringkan (Pedoman Teknik Dasar Untuk Laboratorium Kesehatan, Ed. 2; 2003).

Air dalam campuran mortar *geopolymer* lebih sedikit penggunaannya dibandingkan dengan mortar biasa. Penggunaan air dalam campuran *geopolymer* yang tidak terlalu banyak akan menghasilkan kuat tekan mortar yang tinggi. Pengurangan jumlah air ini berdampak pada rendahnya tingkat *workability* yang berakibat sulitnya proses pengadukan dan pencetakan.

4. Sodium Hidroksida (NaOH)

Sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam *fly ash* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Dalam campuran *fly ash* dan hidroksida yang diamati dalam ukuran mikrometer, terlihat adanya ikatan yang kurang kuat tetapi lebih padat dan tidak ada retakan seperti pada campuran sodium silikat dan *fly ash* (Frantisek skvara, dkk).

5. Sodium Silikat (Na_2SiO_3)

Sodium silikat dapat dibuat dengan 2 proses yaitu proses kering dan proses basah. Pada proses kering, pasir (SiO_2) dicampur dengan *Sodium Carbonate* (Na_2CO_3) atau dengan *Pottasium Carbonate* (K_2CO_3) pada temperatur 1100 - 1200°C. Hasil reaksi tersebut menghasilkan kaca (*cullets*) yang dilarutkan kedalam air dengan tekanan tinggi menjadi cairan yang bening dan agak kental. Sedangkan pada proses pembuatan basah, pasir (SiO_2) dicampur dengan Sodium Hidroksida (NaOH) melalui proses filtrasi akan menghasilkan sodium silikat yang murni (Andi dan Calvin, 2006).

6. Larutan Aktivator

Aktivator merupakan zat atau unsur yang menyebabkan zat atau unsur lain bereaksi. Dalam penelitian ini, aktivator yang digunakan adalah unsur alkali yang terhidrasi yaitu Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3). Sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur Al dan Si, sedangkan sodium silikat mempunyai fungsi untuk mempercepat polimerisasi (Hardjito et al, 2004 dalam Fitriani, 2010).

Jenis alkali aktivator yang sering digunakan dan mudah di dapatkan adalah larutan Natrium Hidroksida (NaOH) dan larutan Natrium Silikat (Na_2SiO_3). Modulus aktivator merupakan perbandingan massa SiO_2 dan Na_2O pada larutan alkali aktivator. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa dosis aktivator menunjukkan peningkatan kuat tekan yang drastis seiring meningkatnya konsentrasi hingga mencapai konsentrasi optimum. Setelah melewati konsentrasi maksimum, kekuatan tidak terlalu meningkat kemudian mengalami penurunan (Putri, 2013).

7. Kuat Tekan Beton

Kuat tekan ditentukan oleh pengaturan dari perbandingan semen, agregat, dan berbagai jenis campuran. Kuat tekan beton adalah besarnya beban maksimum persatuan luas, yang menyebabkan benda uji beton hancur bila dibebani dengan gaya beban tertentu yang dihasilkan oleh mesin tekan. Kuat tekan beton ditentukan oleh perbandingan semen, agregat halus, air dan berbagai jenis bahan tambahan (Tjokrodinuljo, 1996).

METODE

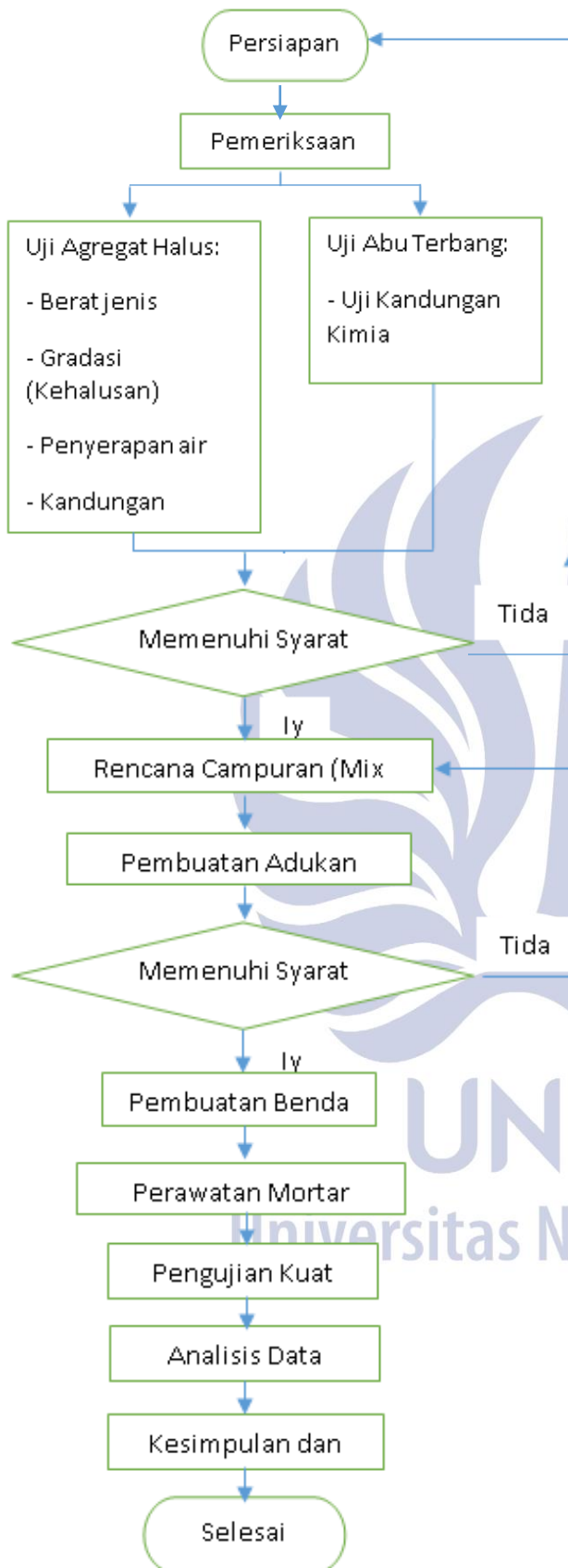
A. Rencana Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah penelitian eksperimental yaitu penelitian ini berasal dari beberapa sumber yang sudah ada melalui jurnal ilmiah untuk selanjutnya dilakukan pengembangan lebih lanjut dengan merancang komposisi beton *geopolymer* berbahan abu terbang menggunakan bahan pengikat cairan *alkaline activator* sodium silikat dan NaOH dengan melakukan percobaan langsung di laboratorium. Penelitian ini menggunakan pendekatan secara uji laboratorium dengan menggunakan rasio NaOH dan Na_2SiO_3 sebagai bahan pengikat abu terbang dan bertujuan untuk mengetahui pengaruh komposisi solid material abu terbang pada beton *geopolymer* dengan *alkaline activator Sodium Hidroksida* (NaOH) terhadap kuat tekan beton. Penelitian ini juga mengamati secara deskriptif kuantitatif dan mengukur hasil dari eksperimen yang dibuat dengan perhitungan kuat tekan di laboratorium. Pada perhitungan kuat tekan rencana penelitian ini menggunakan K225 dan menggunakan benda uji mortar ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$.

B. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian eksperimental dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Bahan dan Beton Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya. Waktu penelitian bahan dan material dilakukan pada bulan November 2017-selesai.

C. Diagram Alur Penelitian



Gambar 3. Diagram Alur Penelitian

Penelitian ini merupakan proses yang dilakukan secara bertahap, yakni dari perencanaan dan perancangan penelitian menentukan fokus penelitian, pengumpulan data dan analisis data.

D. Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah data hasil pengujian kubus mortar $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ berupa data kuat tekan mortar tanpa semen.

Sampel adalah sebagian atau wakil populasi yang diteliti (Arikunto, 2002 : 109; Furchan, 2004: 193). Penelitian ini digunakan sampel dari semen populasi dikarenakan jumlah populasi bersifat data hasil pengujian di Laboratorium dengan sample benda uji berjumlah 126 buah dengan kubus $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Pemeriksaan Material

1. Agregat Halus (Pasir)

Pasir yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir lumajang yang didapat dari toko bangunan UD. Bangun Persada, Jambangan Surabaya dimana letak toko dekat dengan laboratorium tempat dilaksanakannya penelitian.

Pengujian terhadap agregat halus yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi pengujian analisa ayakan pasir, berat jenis, dan penyerapan pasir, berat isi atau berat per volume pasir, dan pengujian kadar lumpur dalam pasir.

2. Abu Terbang (Fly Ash)

Pengujian abu terbang dimaksudkan untuk mengetahui kandungan kimia yang terkandung di dalam abu terbang tersebut. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Sentral Mineral dan Material Maju FMIPA Universitas Negeri Malang (UM) menggunakan metode *X-Ray Fluorescence* (XRF).

Pengujian XRF dilakukan untuk mengetahui presentase komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam *fly ash*, yang diharapkan sebagian besar unsur-unsur yang terkandung dalam *fly ash* adalah unsur kapur (CaO), alumina (Al_2O_3), dan *silica* (SiO_2) karena ketiga unsur tersebut merupakan unsur yang terkandung dalam

semen. Berikut hasil tes *X-Ray Fluorecence* (XRF) abu terbang (*fly ash*).

Tabel 1. Hasil Pengujian XRF abu terbang (*fly ash*)

Coumpound	Conc (%)	Methods
Al ₂ O ₃	4,9	XRF
SiO ₂	13,4	
K ₂ O	1,4	
CaO	18,3	
TiO ₂	1,21	
V ₂ O ₅	0,05	
Cr ₂ O ₃	0,11	
MnO	0,55	
Fe ₂ O ₃	54,62	
NiO	0,16	
CuO	0,093	
Rb ₂ O	0,28	
Coumpound	Conc (%)	Methods
SrO	1,00	XRF
BaO	0,47	
Fu ₂ O ₃	0,47	
Re ₂ O ₇	0,1	

A. Hubungan Pengaruh Rasio W/S dan Perbandingan Na₂SiO₃/NaOH terhadap Kuat Tekan

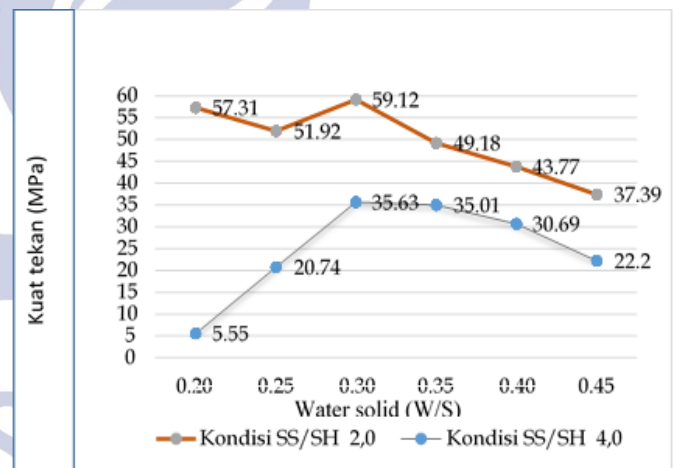
Kaitan antara kuat tekan geopolimer dari abu terbang terhadap perbandingan Na₂SiO₃/NaOH bisa dilihat pada gambar 3. Sampel yang mempunyai perbandingan Na₂SiO₃/NaOH lebih besar mempunyai nilai kuat tekan yang relatif lebih baik. Semakin besar perbandingan Na₂SiO₃/NaOH maka kuat tekan yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Hal ini terjadi karena jumlah Na₂SiO₃ semakin banyak. Na₂SiO₃ berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Reaksi polimerisasi adalah reaksi pengikatan rantai monomer Si-O dan Al-O yang terkandung dalam *fly ash* dan juga Na₂SiO₃ yang kemudian akan mengkristal (Hardjito dan Rangan, 2005).

Tabel 2. Kuat Tekan Rata-rata dengan kondisi SS/SH 2,0 pada umur 28 hari

Mix Design	Umur (hari)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
B (W/S=0,20)	28	57,31
C (W/S=0,25)	28	51,92
D (W/S=0,30)	28	59,12
E (W/S=0,35)	28	49,18
F (W/S=0,40)	28	43,77
G (W/S=0,45)	28	37,39

Tabel 3. Kuat Tekan Rata-rata dengan kondisi SS/SH 4,0 pada umur 28 hari

Mix Design	Umur (hari)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
B (W/S=0,20)	28	5,55
C (W/S=0,25)	28	20,74
D (W/S=0,30)	28	35,63
E (W/S=0,35)	28	35,01
F (W/S=0,40)	28	30,69
G (W/S=0,45)	28	22,20



Gambar 4. Water Solid Ratio dengan Kuat Tekan pada kondisi SS/SH 2,0 dan 4,0

Berdasarkan hasil kuat tekan rata rata pada umur 28 hari pada kondisi SS/SH 2,0 dan SS/SH 4,0 yang terdapat pada **Gambar 4.** secara umum dapat disimpulkan bahwa kuat tekan yang dihasilkan mortar *geopolymer* pada kondisi SS/SH 2,0 lebih tinggi daripada kuat tekan yang dihasilkan pada kondisi SS/SH 4,0. Kuat tekan yang terjadi relatif sama pada kedua kondisi. Pada variasi w/s 0,20 ke variasi w/s 0,25 mengalami peningkatan selanjutnya pada

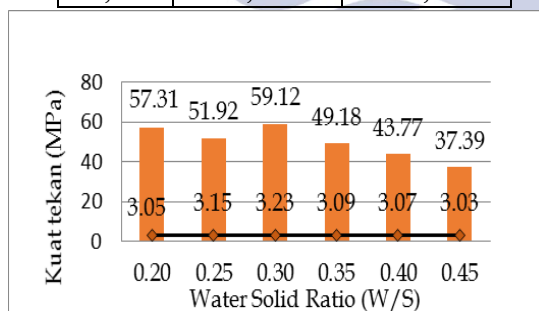
variasi w/s 0,25 ke variasi w/s 0,30 sama-sama mengalami peningkatan cukup besar. Pada variasi w/s 0,30 ke variasi w/s 0,35 mengalami penurunan. Sedangkan pada variasi w/s 0,35 ke variasi w/s 0,40 kedua kondisi mortar cenderung kuat tekannya menurun, selanjutnya dari variasi w/s 0,40 ke variasi w/s 0,45 kembali menurun yaitu menghasilkan kuat tekan lebih kecil dari pada variasi w/s 0,40. Kuat tekan optimum pada kondisi SS/SH 2,0 dan SS/SH 4,0 yaitu sama terjadi pada variasi w/s 0,30.

B. Hubungan Berat Per Volume Mortar Geopolymer dengan Kuat Tekan pada Umur 28 Hari

1. Hubungan berat per volume dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 2.0

Tabel 4. Tabel Berat volume dan kuat tekan pada kondisi SS/SH 2.0

Water Solid	Berat (gram/cm ³)	Kuat Tekan (MPa)
0,20	3,05	57,31
0,25	3,15	51,92
0,30	3,23	59,12
0,35	3,09	49,18
0,40	3,07	43,77
0,45	3,03	37,39



Gambar 5. grafik Berat volume dan kuat tekan pada kondisi SS/SH 2.0

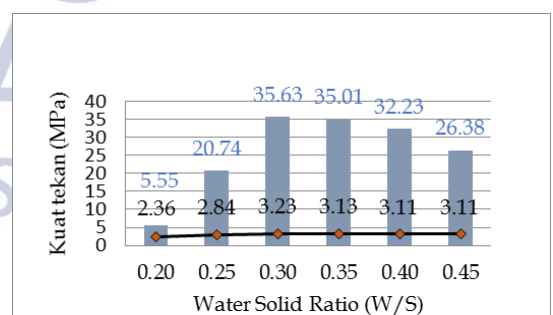
Dari **Tabel 4.** dan **Gambar 5.** diatas dapat diketahui bahwa mortar pada usia 28 hari menghasilkan berat volume terbesar yaitu 3,23 gram/cm³ dan nilai kuat tekan tertinggi yaitu 59,12 Mpa yang di dapat pada variasi w/s 0,30. Hasil berat dan kuat tekan tersebut tertinggi dibandingkan hasil yang didapat pada variasi w/s<0,30 atau pada variasi

w/s>0,30. Hubungan kuat tekan dengan berat volume pada benda uji ternyata mempunyai pengaruh yang sangat erat. Pada variasi w/s<0,30 memungkinkan adanya porositas (banyak titik kosong/pori-pori tidak rapat) pada mortar yang kemungkinan besar disebabkan karena larutan aktivator yang lebih sedikit sehingga mortar tidak padat/mudah keropos yang pada akhirnya mempengaruhi berat volume yang dihasilkan pada mortar itu sendiri. Sedangkan pada variasi w/s > 0,30 terlalu besar sehingga memungkinkan terisi air pada saat mortar kering yang pada akhirnya menyebabkan kecilnya hasil yang didapat pada kuat tekan serta berat volumenya.

2. Hubungan berat per volume dengan kuat tekan pada kondisi SS/SH 4.0

Tabel 5. Tabel Berat volume dan kuat tekan pada kondisi SS/SH 4.0

Water Solid	Berat (gram/cm ³)	Kuat Tekan (MPa)
0,20	2,36	5,55
0,25	2,84	20,74
0,30	3,23	35,63
0,35	3,13	35,01
0,40	3,11	32,23
0,45	3,11	26,38



Gambar 6. grafik Berat volume dan kuat tekan pada kondisi SS/SH 4.0

Dari **Tabel 5.** dan **Gambar 6.** diatas dapat diketahui bahwa mortar pada usia 28 hari menghasilkan berat volume terbesar yaitu 3,23 gram/cm³ dan nilai kuat tekan tertinggi yaitu 35,63 MPa yang di dapat pada variasi w/s 0,30. Hasil berat dan kuat tekan tersebut tertinggi dibandingkan hasil yang didapat

C. Hubungan *Setting Time* dengan hasil XRF *Fly Ash*

Gambar 7. Kandungan *Fly Ash* Lama

Gambar 8. Kandungan *Fly Ash* Baru

tersebut dapat di lihat pada **Gambar 7.** dan **Gambar 8.** diatas. *Fly ash* tipe C biasanya dihasilkan dari pembakaran batu bara sub bitumen yang memiliki sifat *pozzolan* dan sifat *cementitious* (ASTM C 618, 2010). Karakteristik lain dari *fly ash* yang pada umumnya dilihat adalah *Loss on Ignition* (LOI), kehalusan dan juga keseragaman partikel. *Fly ash* tipe C menghasilkan kuat tekan yang tinggi dikarenakan memiliki kadar CaO yang tinggi.

Maka dari itu saat proses penelitian terjadi suatu masalah dengan bahan *fly ash* yang di pakai untuk pencampuran pembuatan mortar *geopolymer*. Dengan adanya perbedaan *fly ash* yang digunakan, tapi masih menggunakan *fly ash* dengan tipe C dan memiliki kandungan kimia yang berbeda dari *fly ash* lama dengan *fly ash* baru. Kandungan yang berbeda dari kedua *fly ash* ini dengan tipe yang sama dapat di lihat pada **Gambar 7.** dan **Gambar 8.** Disini dapat di perbedakan kandungan antara kedua *fly ash* ini dengan pengaruh kandungan kimia salah satunya kalsium (Ca) terhadap *geopolymer*. Dari hasil tes XRF dapat dilihat bahwa kandungan kalsium (Ca) dari *fly ash* lama lebih tinggi dari Ca dari *fly ash* baru, dengan hasil *fly ash* lama Ca sebesar 55,4% dan *fly ash* baru Ca sebesar 59,0%. *Fly ash* dengan kadar CaO yang tinggi dapat menghasilkan kuat tekan yang tinggi dan mengalami reaksi hidrasi dan reaksi polimerisasi secara bersamaan. Reaksi hidrasi akan menghasilkan panas sedangkan beton geopolimer membutuhkan suhu awal yang rendah agar tidak terjadi *flash setting* (Antoni, Wijaya, & Hardjito, 2016).

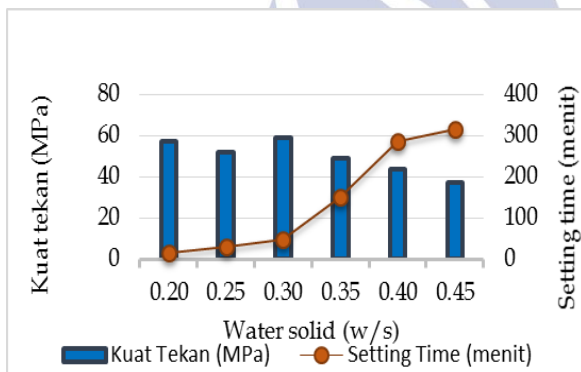
11

(Ghorman & Anastasia, 2016). Cara lain untuk memperlambat *initial setting time* adalah dengan menurunkan suhu awal campuran. Terbukti bahwa dengan menurunkan suhu awal campuran, *initial setting time* bisa menjadi lebih lama (Antoni et al., 2016).

D. Hubungan *Setting time* dengan Kuat Tekan

Tabel 6. Hubungan Waktu Pengikatan dengan Kuat Tekan pada Kondisi SS/SH 2,0

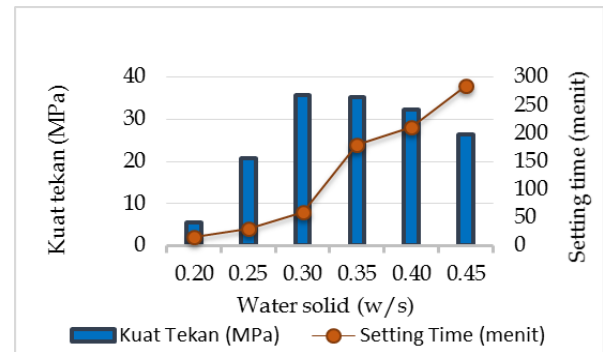
w/s	Kuat Tekan (MPa)	<i>Setting Time</i> (menit)
0,20	57,31	15
0,25	51,92	30
0,30	59,12	49
0,35	49,18	150
0,40	43,77	285
0,45	37,39	315



Gambar 9. Hubungan *Setting Time* dengan Kuat Tekan Kondisi SS/SH 2,0.

Tabel 7. Hubungan Waktu Pengikatan dengan Kuat Tekan pada Kondisi SS/SH 4,0

w/s	Kuat Tekan (MPa)	<i>Setting Time</i> (menit)
0,20	5,55	15
0,25	20,74	30
0,30	35,63	60
0,35	35,21	180
0,40	32,23	210
0,45	26,38	285



Gambar 9. Hubungan *Setting Time* dengan Kuat Tekan Kondisi SS/SH 4,0

Pada tabel dan gambar tersebut telah disajikan hasil kuat tekan beserta waktu pengikatan (*setting time*). Pada beton *geopolymer* dengan kondisi SS/SH 2,0 dan SS/SH 4,0 dengan variasi w/s 0,20 diamati memiliki nilai kuat tekan terendah diantara variasi w/s yang lainnya. Untuk nilai kuat tekan kondisi SS/SH 2,0 variasi w/s 0,20 berkuat tekan 57,31 MPa dengan waktu pengikatan awal pada menit ke 4 dan pengikatan akhir pada menit ke 15. Untuk nilai kuat tekan pada kondisi SS/SH 4,0 variasi w/s 0,20 juga memiliki kuat tekan terendah yaitu berkuat tekan sebesar 5,55 MPa dengan waktu pengikatan awal pada menit ke 10 dan pengikatan akhir pada menit ke 15. Untuk variasi w/s 0,45 pada kondisi SS/SH 2,0 dan SS/SH 4,0 memiliki waktu pengikatan (*setting time*) terlama yaitu dengan pengikatan awal 105 dan pengikatan akhir 315 untuk kondisi SS/SH 2,0 dengan nilai kuat tekan sebesar 37,39 MPa. Sedangkan waktu pengikatan awal di menit 105 dan pengikatan akhir di menit 285 untuk kondisi SS/SH 4,0 dengan nilai kuat tekan sebesar 26,38 MPa.

SIMPULAN DAN SARAN

A. Simpulan

Dari hasil penelitian dan pembahasan dapat diperoleh kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Berdasarkan penelitian yang dilakukan, semakin tinggi komposisi campuran sodium silikat (Na_2SiO_3) dan sodium hidoksida (NaOH) tidak selalu menghasilkan kuat tekan yang tinggi. Hasil pengujian kuat tekan mortar *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* saat dilakukan

penambahan *sodium hidroksida* (NaOH) dan *sodium silika* (Na_2SiO_3) dengan perbedaan komposisi *water solid ratio* mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Hal ini dapat terlihat pada kondisi SS/SH 2,0 dari variasi w/s 0,20 mengalami peningkatan hingga mencapai puncak pada variasi w/s 0,30 pada usia 28 hari. Selanjutnya hasil kuat tekan mortar menurun mulai variasi w/s 0,35 hingga menuju variasi w/s 0,45, sedangkan untuk kondisi SS/SH 4,0 juga sama seperti yang terjadi pada kondisi SS/SH 4,0.

2. Hasil nilai kuat tekan pada *mortar geopolimer* berbahan dasar *fly ash* tipe C dengan larutan aktivator NaOH sebesar 12 molar, standar nilai optimum terdapat pada rentang variasi w/s 0,30 pada kondisi SS/SH 2,0 dan 0,30 pada kondisi SS/SH 4,0. Kuat tekan optimum yang dihasilkan pada *mortar geopolimer* berbahan dasar *fly ash* tipe C dengan larutan aktivator NaOH 12 molar, pada kondisi SS/SH 2,0 terdapat variasi w/s 0,30 dengan nilai kuat tekan sebesar 59,12 MPa dan pada kondisi SS/SH 4,0 pada variasi w/s 0,30 dengan nilai kuat tekan sebesar 35,63 MPa.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Palomo, M.W. Grutzeck, dan M.T. Blanco. 1999. "*Alkali-Activated Fly Ash Cement for Future*". Cement and Concrete Research, 29(8); pp.1323-1329.
- ACI 226.3R-3 Part 1 (1993). *Manual of Concrete Practice*
- ACI 232.2R-03 (2003). *Use of Fly Ash in Concrete*. Reported by ACI Committee 232, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan 48333-9094.
- Adam, Andi Arham. 2009. *Strenght and durability properties of alkali actived slag and fly ashbased geopolimer concrete*. Thesis. Australia: RMIT University.
- Ariffin, M., M Azreen., M.W. Hussin., M.A.R. Bhutta. 2011. Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Using Blended Ash from Agro-Industrial Waste. *Advanced Materials Research* Vol 339 pp 452-457.
- ASTM.C,1240,1995: 637-642, "*Spesification for Silica Fume faor Use in Hydraulic Cement Concrete and Mortal*".
- ASTM C1585-04. *Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic cement concretes*. West conschohocken.
- Barbosa, M.T, Dkk. 2005. *Applied and Environmental Microbiology: Screening for Bacillus Isolates in The Broiler Gastrointestinal Tract*. Vol 71. no.2. Hal 968-978. American Society for Microbiology. America.
- Davidovits, J, Geopolymer : Inorganic Polymeric New Materials, Geopolymer Institut, France, 1991.
- Davidovits, Joseph. 1994. "Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries". *World Resource Review*. Vol. 6 (2) : pp (263-278)
- Davidovits, J., 1999. *Chemistry of Geopolymer System, Terminology*. Paper presented at the Geopolymer '99 International Conference, Saint-Quentin, France.
- Ekaputri, Januarti J. and Triwulan, "*The Efforts to Use Porong Mud as an Additive Material for Geopolymer Concrete*". Presented at the National Seminar on The Efforts to Use Porong Mud as a Building Materia, ITS, Surabaya, Indonesia, October 3rd 2006. Organized by KLH-ITS Indonesia.
- Frantisek Skvara, dkk (2006). Concrete bash on fly ash geopolimer.
- Hardjito D, et all. 2004. "On the development of flyash-based geopolimer concrete". *ACI Materials Journal* 101(6) : pp (467-472).
- Hardjito, D., Rangan B. V., 2005. *Development and properties of Low-calcium fly ash-based Geopolymer concrete*, Research Report GC 1 Faculty of Engineering Curtin University of Technology Perth, Australia.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D.M.J. & Rangan, B.V. 2004. On the development of fly ash-based geopolimer concrete. *ACI Materials Journal* Vol 101(6): 467-472.

- H. Xu dan J.S.J. van Deventer. 2000. *"The Geopolymerisation of Alumino- Silicate Minerals"*. International Journal of Mineral Processing 59(3) : 247-226.
- McDowell, I. 2006. Measuring Health: A Guide to Rating Scales and Questionnaires, Third Edition. New York: Oxford University Press, inc.
- Patankar SV, Ghugal YM, Jamkar SS. Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash--based geopolymer mortar. Indian journal of materials science, 2014; 1-6.
- Robbins, Stephen and Judge, Timothy A.2007. Organizational Behaviour.12nd edition. Upper Saddle River:New Jersey.
- Septia, P. 2011. *Studi Literatur Pengaruh Konsentrasi NaOH dan Rasio NaOH : Na₂SiO₃, Rasio Air/Prekursor, Suhu Curing, dan Jenis Perkursor Terhadap Kuat Tekan beton Geopolymer*. Jurusan Teknik Sipil: Universitas Indonesia.
- SNI 03-6863-2002. *Metode pengambilan contoh dan pengujian abu terbang atau pozolan alam sebagai mineral pencampur dalam beton semen portland*. Badan Standardisasi Nasional.
- Tjokrodinuljo, K., 1996, *"Teknologi Beton"*, Nafiri. Yogyakarta
- Van Jaarsveld, J.G.S, van Deventer, J.S.J. & Lukey, G.C. 2002. The effect of composition and temperature on the properties of fly ash and kaolinite based geopolymers. Chemical Engineering Journal 89: 63-73.
- Yuwono, T. 2002. *Biologi Molekuler*. Penerbit Erlangga. Jakarta.
- Hardjito, D. 2005. Development and properties of low calcium fly ash based geopolymer concrete. PhD Thesis of Civil Engineering & Computing Department. Perth: Curtin University of Technology.