

# **SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLIMER DENGAN AGREGAT TAILING**

**Naskah Publikasi**

Untuk memenuhi sebagian persyaratan  
mencapai derajat Sarjana S-2

Program Studi Teknik Sipil  
Magister Teknologi Bahan Bangunan



Diajukan Oleh :

**RUDI SETIADJI A**

09/293974/PTK/06382

Kepada  
**PROGRAM PASCASARJANA  
UNIVERSITAS GADJAH MADA  
YOGYAKARTA  
2011**

**Lembar Persetujuan**

**Naskah Publikasi**

**SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLIMER DENGAN  
AGREGAT TAILING**

Diajukan oleh :

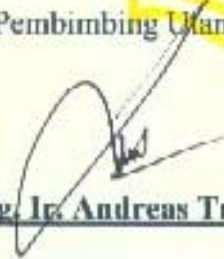
RUDI SETIADJI A

09/293974/PTK/06382




telah disetujui oleh :

Pembimbing Utama

  
Dr. Ing. Ir. Andreas Triwiyono

Tanggal :

Pembimbing Pendamping

  
Prof. Ir. Rochmadi, SU, Ph.D

Tanggal : 11/04/2011

**Lembar Reviewer**

**Naskah Publikasi**

**SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLIMER DENGAN  
AGREGAT TAILING**

Disusun oleh :

**RUDI SETIADJI A**

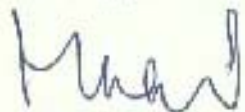
09/293974/PTK/06382

Tim pembimbing :

**Dr.-Ing. Ir. Andreas Triwiyono  
Prof. Ir. Rochmadi, SU, Ph.D**

disetujui oleh :

Penguji/Reviewer



Dr. Ir. Muslikh, M.Sc., M.Phil.

Tanggal : 11/4/11

## SIFAT MEKANIK BETON GEOPOLIMER DENGAN AGREGAT TAILING

Rudi Setiadji A<sup>1)</sup>, Dr.–Ing. Ir. Andreas Triwiyono<sup>2)</sup>, Prof. Ir. Rochmadi, SU, Ph.D<sup>3)</sup>

### INTISARI

*Geopolimer memungkinkan untuk penggantian seluruh semen dalam aplikasi konstruksi beton. Material tailing seperti pasir limbah dari P.T Freeport Indonesia terdapat di Timika, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua, jumlah produksi 80.000 – 100.000 ton per hari. Penggunaan fly ash sebagai bahan pengikat geopolimer dengan tailing sebagai bahan agregat halus dalam beton berpotensi meningkatkan pemanfaatan kedua limbah tersebut. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui kontribusi faktor pengaruh terhadap sifat mekanik, karakteristik jangka pendek beton geopolimer, dan komposisi campuran optimum yang menghasilkan sifat mekanik yang baik.*

*Bahan pengikat dalam penelitian ini menggunakan fly ash tipe F dari PLTU Suralaya dengan aktivator NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> sedangkan agregat halus menggunakan tailing PT. Freeport Indonesia. Kegiatan penelitian dilakukan melalui tiga tahap terdiri dari pembuatan mortar (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup> geopolimer dengan aktivator larutan NaOH, pembuatan mortar (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup> geopolimer dengan aktivator gabungan larutan NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, dan pembuatan beton geopolimer dengan aktivator gabungan larutan NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> bentuk silinder diameter 10 tinggi 20 cm dan balok (10 x 10 x 40) cm<sup>3</sup>. Tinjauan sifat mekanik meliputi kuat tekan, kuat lentur, modulus elastisitas, hubungan tegangan-regangan uji tekan, kerapatan, penyerapan, dan kadar rongga. Variasi konsentrasi NaOH 8, 10, dan 12 M, rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH sebesar 1, 2, dan 3, rasio aktivator/fly ash antara 0,3 – 0,5. Metode pemadatan dengan penusukan dan perawatan dengan suhu ruang tanpa perlakuan khusus.*

*Kontribusi berbagai faktor pengaruh dalam rancang campur terhadap sifat mekanik beton geopolimer telah diketahui. Semakin banyak tailing, semakin kecil kuat tekan. Aktivator/fly ash beton geopolimer 0,4 hingga 0,5 menyebabkan kuat tekan berkurang. Konsentrasi NaOH 8 M hingga 12 M, tidak banyak mengurangi kuat tekan mortar. Nilai optimum waterglass/NaOH sebesar 2. Rasio Si/Al 3,402 hingga 3,618 berpengaruh negatif dan nilai 3,646 hingga 3,787 memiliki nilai optimum. Karakteristik jangka pendek sifat mekanik mortar dan beton geopolimer dengan agregat tailing sebagai berikut. Kuat tekan beton geopolimer minimal umur 7 hari sebesar 28,21 MPa dapat dicapai dengan metode perawatan suhu ruang. Nilai slump beton segar hingga 230 mm. Penyerapan air kurang dari 4,19%. Volume rongga permeabel 8,79 – 9,39 %. Modulus elastisitas beton geopolimer lebih rendah daripada perhitungan beton normal SNI 03-2847-2002. Kuat tarik lentur umur 28 hari lebih dari 5,90 MPa. Rancang campur optimal dengan sifat mekanik yang memenuhi syarat untuk beton adalah komposisi fly ash : agregat 1 : 3, rasio tailing : split 43 : 57, aktivator/fly ash 0,4, konsentrasi NaOH 10 M, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH sebesar 2 menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik lentur 28 hari hingga 44,42 MPa dan 5,90 MPa*

**Kata kunci :** *sifat mekanik, geopolimer, fly ash, tailing*

- 1) Mahasiswa Pasca Sarjana Program Studi MTBB Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan FT Universitas Gadjah Mada.
- 2) Dosen Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, selaku pembimbing utama.
- 3) Dosen Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, selaku pembimbing pendamping.

## **MECHANICAL PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE WITH TAILING AGGREGATE**

*Rudi Setiadji A<sup>1)</sup>, Dr.-Ing. Ir. Andreas Triwiyono<sup>2)</sup>, Prof. Ir. Rochmadi, SU, Ph.D<sup>3)</sup>*

### **ABSTRACT**

*Geopolymer allows for replacement of the cement in concrete construction applications. Tailing is material such as sand-sized waste from PT Freeport Indonesia in Timika, Mimika District, Papua Province, with a total production of about 80,000 to 100,000 tons per day. The use of fly ash as a binder geopolymer with tailings as fine aggregate in concrete has the potency to increase the utilization of both the waste. The research goal is to find the influence of factors contributing to the mechanical properties, characteristics of short-term geopolymer concrete, and the optimum mixture composition that produces good mechanical properties.*

*Binder of fly ash type F from Suralaya with activators NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> are used without the use of cement while the filler material is tailing of PT. Freeport Indonesia. Research activities was conducted through three stages, consisting of the manufacture of mortars (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup> geopolymer with NaOH activator, making mortars (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup> geopolymer with a combination of activators NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, and the manufacture of geopolymer concrete with a combination of activators NaOH and Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> forming cylinder diameter 10 cm high 20 cm and beam (10 x 10 x 40) cm<sup>3</sup>. Review of mechanical properties include compressive strength, flexural strength, modulus elasticity, stress-strain relationship test press, density, absorption, and volume of permeable void. The variation of the concentration of NaOH is 8, 10, and 12 M, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH ratio of 1, 2, and 3, the ratio of activator/fly ash between 0.3 to 0.5. Compaction method with rodding and curing in room temperature without special treatment.*

*The influence of factors contributing to the mechanical properties has been discovered. Increasing tailing reduced the compressive strength. Activator/fly ash 0.4 to 0.5 decreased the compressive strength. NaOH concentration 8M to 12 M reduced slightly the compressive strength. Optimum value of waterglass/NaOH is 2. Si/Al ratio 3.402 to 3.618 negatively influenced the compressive strength and between 3.646 to 3.787 has an optimum value. Characteristics of short-term geopolymer concrete are as follow. Minimum concrete compressive strength at 7<sup>th</sup> days was 28.21 MPa in room temperature curing. Slump value was up to 230 mm. Absorption was less than 4.19%. Permeable void volume were 8.79 – 9.39 %. Modulus of elasticity were lower than calculation of normal concrete by SNI 03-2847-2002. Flexural tensile strength 28<sup>th</sup> days were greater than 5.90 MPa. The optimum mixture composition that produces good mechanical properties was at fly ash : aggregate 1: 3, the ratio of tailings : split of 43: 57, the ratio of activator/fly ash by 0.4, NaOH concentration of 10 M, the ratio of Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH as 2 produced 28<sup>th</sup> days compressive strength and flexural tensile strength up to 44.42 MPa and 5.90 MPa.*

**Keywords:** *mechanical properties, geopolymer, fly ash, tailings*

1) Postgraduate student, Master of Building Material Technology, Engineering Faculty, Gadjah Mada University

2) Senior supervisor, Civil Engineering and Environment Department, Engineering Faculty, Gadjah Mada University

3) Second supervisor, Chemical Engineering Department, Engineering Faculty, Gadjah Mada University

## PENDAHULUAN

Semen portland biasa digunakan sebagai bahan pengikat dalam campuran beton. Proses produksi semen portland sangat berpengaruh terhadap lingkungan. Penggunaan energi yang dibutuhkan dan jumlah CO<sub>2</sub> yang dihasilkan dalam proses pembakaran sangat besar. Davidovits memperkenalkan geopolimer pada tahun 1979, yaitu bahan pengikat yang dapat dihasilkan dari reaksi polimer larutan alkali dengan silika dan aluminium yang terkandung dalam material geologi seperti *fly ash*, *blast furnace slag*, metakaolin atau abu sekam padi (Davidovits, 2002). Proses pembuatan menggunakan bahan limbah diperkirakan dapat mengurangi emisi CO<sub>2</sub> dan biaya produksi. Geopolimer berpotensi mengurangi dominasi semen portland karena dapat mengganti seluruh penggunaan semen dalam aplikasi konstruksi beton.

Di Timika, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua, terdapat material yang berukuran seperti pasir yang merupakan limbah dari P.T Freeport Indonesia (PTFI) sebagai bahan hasil buangan dari proses penambangan bijih emas dan tembaga, yang disebut dengan tailing. Jumlahnya terus meningkat setiap tahun dan sekarang sudah mencapai 300.000 ton per hari. *Tailing* dialirkan melalui sungai Aghawagon/Ajkwa yang berada di sebelah timur kota Timika. Hal ini dapat menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan sekitarnya karena jumlahnya terus bertambah.

Penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengikat geopolimer dengan tailing sebagai bahan agregat pengisi dalam beton berpotensi untuk meningkatkan pemanfaatan kedua limbah tersebut. Rumusan masalah yang dihadapi adalah perlu dikembangkan rancang campur beton geopolimer *fly ash* dengan agregat tailing yang optimal sehingga memiliki sifat mekanik yang memenuhi syarat untuk beton.

Penelitian tesis tentang beton geopolimer *fly ash* dengan agregat tailing dilakukan dengan tujuan mengetahui kontribusi berbagai faktor pengaruh dalam rancang campur terhadap sifat mekanik beton geopolimer, mengetahui karakteristik jangka pendek sifat mekanik mortar dan beton geopolimer dengan agregat tailing, mendapatkan rancang campur optimal dengan sifat mekanik yang memenuhi syarat untuk beton.

## METODE PENELITIAN

### A. Bahan dan Peralatan

Penelitian ini menggunakan *fly ash* dari PLTU Suralaya di Banten, tailing dari PT. Freeport Indonesia di Papua, split dari Lagadar di Cimahi, soda api (NaOH) berupa *flakes* dari Bratachem di Bandung, *waterglass* (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) berupa larutan dari Bratachem di Bandung, air dari jaringan air bersih Puslitbang Permukiman di Bandung. Peralatan yang digunakan cetakan kubus mortar

(5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup>; cetakan silinder beton diameter 10 cm dan tinggi 20 cm; cetakan balok beton (10 x 10 x 40) cm<sup>3</sup>; *mixer* mortar kapasitas 2 liter; *mixer* beton kapasitas 0,3 m<sup>3</sup>; *compression testing machine* kapasitas 20 ton untuk uji tekan kubus mortar dan balok beton; *compression testing machine* kapasitas 200 ton untuk uji tekan silinder beton; *data logger* untuk bacaan *strain gage* dalam pengukuran regangan tekan beton; alat bantu lainnya.

## B. Rancang Campuran

Penelitian yang dimulai dari tahap bentuk mortar dan jumlah *fly ash* ditetapkan sebesar 500 kg/m<sup>3</sup> untuk setiap campuran mortar dan beton. Komposisi campuran menggunakan perbandingan bahan dalam berat.

### 1. Mortar geopolimer dengan larutan NaOH

Benda uji kubus (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup>, uji tekan umur 7, 28, dan 60 hari masing-masing 3 buah. Variasi campuran disusun dengan menggunakan variabel tetap dan tidak tetap.

- a. Variabel tetap adalah agregat 100% tailing; rasio *fly ash* : tailing sebesar 1 : 2, 1 : 3, 1 : 4.
- b. Variabel tidak tetap adalah rasio aktivator/*fly ash* antara 0,3 , 0,4 , dan 0,5; konsentrasi larutan sodium hidroksida (NaOH) sebesar 8, 10, dan 12 M;

### 2. Mortar geopolimer dengan gabungan larutan NaOH dan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

Benda uji kubus (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup>, uji tekan umur 7, 28, dan 60 hari masing-masing 3 buah. Variasi campuran disusun dengan menggunakan variabel tetap dan tidak tetap.

- a. Variabel tetap terdiri dari agregat 100% tailing; rasio *fly ash* terhadap tailing sebesar 1 : 3; konsentrasi larutan sodium hidroksida (NaOH) sebesar 10 M.
- b. Variabel tidak tetap terdiri dari rasio aktivator/*fly ash* antara 0,4, 0,5, dan 0,6; rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH sebesar 1, 2, dan 3.

### 3. Beton geopolimer dengan gabungan larutan NaOH dan *waterglass*

Benda uji silinder diameter 10 cm dan tinggi 20 cm, uji tekan pada umur 7, 28, dan 60 hari masing-masing 3 buah, untuk uji kerapatan, penyerapan, dan kadar rongga umur 28 hari sebanyak 3 buah. Benda uji balok tanpa tulangan (10 x 10 x 40) cm<sup>3</sup> untuk uji kuat lentur 14 dan 28 hari masing-masing 3 buah. Perbandingan berat tailing dan split sebesar 43% : 57% berdasarkan SNI 03-2834-1993. Variasi campuran menggunakan variabel tetap dan tidak tetap.

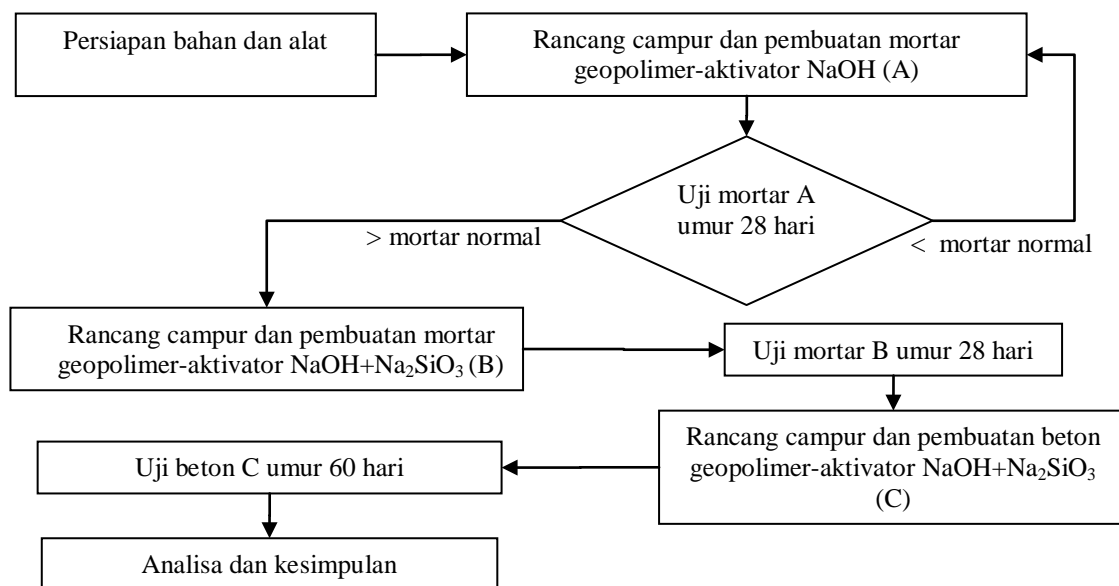
- a. Variabel tetap terdiri dari agregat 100% tailing; rasio *fly ash* : tailing sebesar 1 : 3; konsentrasi larutan NaOH sebesar 10 M; rasio Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH sebesar 2.
- b. Variabel tidak tetap terdiri dari rasio aktivator/*fly ash* antara 0,4, 0,45, dan 0,5.

### C. Pembuatan dan Perawatan Benda Uji

Pembuatan mortar dan beton geopolimer dimulai dari aktivator larutan NaOH dan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dibuat 24 jam sebelum pengadukan; agregat kondisi *saturated surface dry* (SSD); agregat dan *fly ash* dicampur kurang lebih 3 menit atau hingga merata sebelum penambahan aktivator; pengadukan agregat, *fly ash*, dan aktivator kurang lebih 4 menit; cara pengecoran dan pemadatan sama dengan beton normal berdasarkan SNI 03-2493-2002. Benda uji kubus mortar disimpan dalam *constant humidity cabinet* pada suhu 26 °C hingga uji kuat tekan. Benda uji silinder dan balok beton setelah pencetakan diletakkan dalam ruangan kondisi suhu ruang tanpa perlakuan khusus.

### D. Lingkup Pekerjaan

Seluruh kegiatan dapat digambarkan dalam diagram alir Gambar 1.



Gambar 1. Pola pikir kegiatan penelitian

## HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### A. Hasil Uji Bahan

Kadar bahan split dan tailing lolos saringan 0,075 mm di bawah batas maksimum SNI 03-6861.1-2002 sebesar 5%. Berat jenis agregat termasuk agregat normal pada kisaran 2,5 – 2,7 dalam SNI 03-6861.1-2002. Gradasi tailing termasuk batas gradasi pasir daerah No. 4 dalam SNI 03-2834-1993, menunjukkan agregat tailing sangat halus untuk ukuran pasir. Tailing dibatasi agregat yang lolos 4,75 mm sebagai pengganti agregat halus, sedangkan untuk agregat beton dicampur split berdasarkan batas gradasi agregat gabungan besar butir maksimum 20 mm



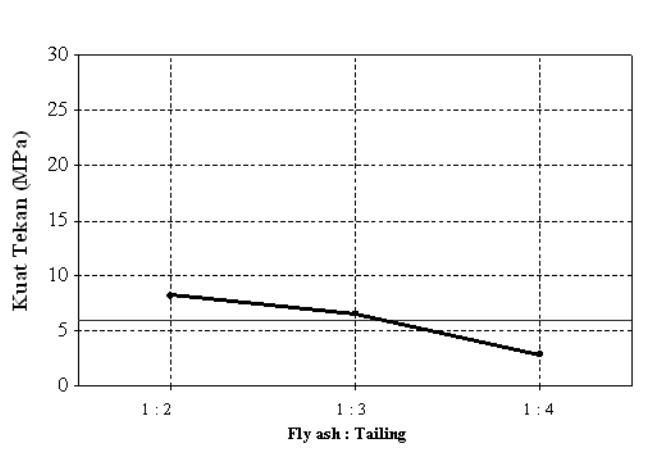
pada SNI 03-2834-1993 Grafik 11. Komposisi agregat gabungan dihasilkan tailing 43% dan kerikil 57%. Beberapa batas ayakan terlampaui tetapi komposisi tersebut merupakan hasil yang paling mendekati batas gradasi agregat gabungan dan atas pertimbangan penggunaan tailing sebanyak mungkin. Jumlah oksida  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  yang diperlukan agar *fly ash* dan tailing dapat digunakan sebagai bahan bersifat pozolan menurut ASTM C 618-03 telah melebihi syarat minimal, termasuk dalam kelas N dan F dengan kandungan CaO kurang dari 10%.

## B. Kontribusi Faktor Pengaruh Dalam Rancang Campur Terhadap Sifat Mekanik Beton Geopolimer

Analisa pengaruh variabel jumlah tailing, aktivator/*fly ash*, konsentrasi NaOH, *waterglass*/NaOH, dan faktor umur terhadap kuat tekan mortar menggunakan program Minitab 16 untuk *analysis of variance* (ANOVA). Analisa pengaruh berbagai variabel terhadap kuat tekan beton dilakukan secara manual tanpa Minitab 16.

### 1. Pengaruh jumlah tailing terhadap kuat tekan

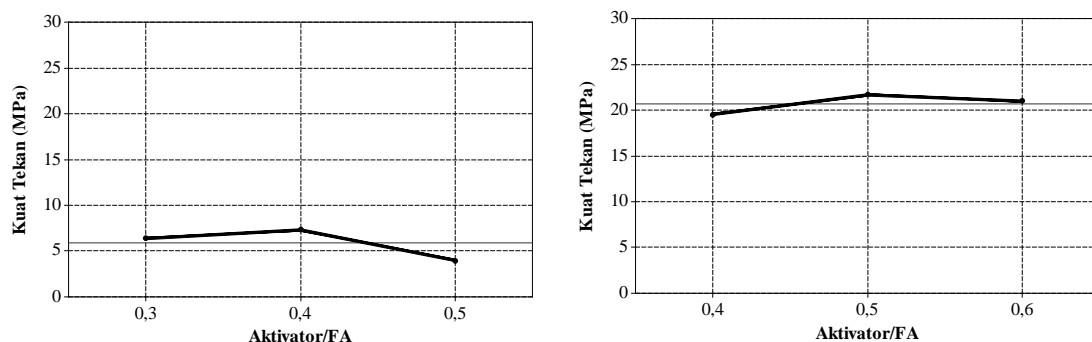
Semakin banyak proporsi tailing pada Gambar 2 maka kuat tekan rata-rata menurun, kemiringan dan selisih perubahan garis pengaruh yang besar menunjukkan perbedaan jumlah tailing terlihat sangat mempengaruhi besarnya nilai kuat tekan. Tailing memiliki potensi sebagai sumber *alumino-silicate* tetapi berdasarkan Gambar 2 tidak memberikan kontribusi terhadap kuat tekan dan lebih banyak berfungsi sebagai bahan pengisi. Jumlah tailing yang bertambah membutuhkan bahan pengikat yang lebih banyak untuk menyelimuti permukaan butiran agregat tailing sedangkan jumlah *fly ash* untuk setiap komposisi campuran sama. Semakin banyak jumlah tailing maka semakin kecil persentase bahan pengikat *fly ash* sehingga kuat tekan berkurang.



Gambar 2. Pengaruh jumlah tailing terhadap kuat tekan mortar A

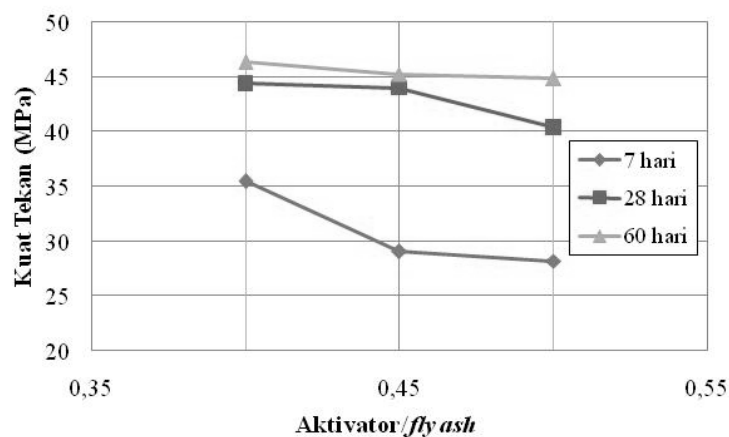
## 2. Pengaruh aktivator/FA terhadap kuat tekan

Jumlah aktivator/*fly ash* pada benda uji mortar A memiliki nilai optimum 0,4 untuk menghasilkan kuat tekan maksimum dan penambahan faktor aktivator/*fly ash* menyebabkan penurunan kuat tekan cukup besar dalam Gambar 3. Kelebihan aktivator tidak bereaksi dengan  $\text{SiO}_2$  dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  *fly ash* dan tailing dan berfungsi sebagai pengisi dalam mortar dan tidak menambah kekuatan. Air pencampur larutan juga semakin banyak, berpotensi menambah kadar rongga. Nilai optimum aktivator/*fly ash* mortar B lebih tinggi agar *workability* bertambah karena aktivator menggunakan tambahan *waterglass* yang lebih kental daripada larutan NaOH.



Gambar 3. Pengaruh jumlah aktivator/*fly ash* terhadap kuat tekan mortar A (kiri) dan mortar B (kanan)

Rasio aktivator/*fly ash* benda uji mortar B pada Gambar 3 memiliki nilai optimum pada 0,5 dan peningkatan nilai selanjutnya menambah kelecakan adukan dan menurunkan kuat tekan mortar. Mortar geopolimer Sathonsaowaphaka dkk. (2009) memiliki rasio aktivator/*ash* optimum 0,429, penambahan rasio akan menurunkan kuat tekan. Pengaruh rasio *fluid/binder* Radhakrishna dkk. (2010) antara 0,45 hingga 0,7 tidak didapatkan nilai rasio optimum tetapi semakin besar nilai rasio maka kuat tekan mortar geopolimer semakin kecil.



Gambar 4. Pengaruh aktivator/*fly ash* terhadap kuat tekan beton C

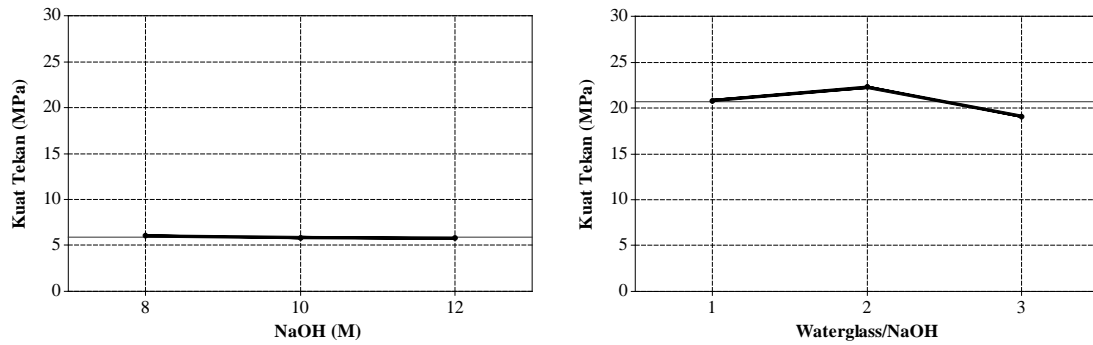
Rasio aktivator/*fly ash* pada mortar dengan larutan NaOH memiliki nilai optimum sebesar 0,4 dan mortar dengan tambahan *waterglass* sebesar 0,5 sedangkan beton tidak memiliki nilai optimum penambahan nilai rasio antara 0,4 hingga 0,5 kuat tekan cenderung turun. Pengaruh rasio aktivator/*fly ash* beton C Gambar 4 sama dengan Radhakrishna dkk. (2010) pada nilai antara 0,45 hingga 0,7, semakin besar nilai rasio maka kuat tekan beton semakin kecil.

### 3. Pengaruh konsentrasi NaOH terhadap kuat tekan

Jika konsentrasi NaOH mortar A antara 8 M hingga 12 M maka kuat tekan cenderung turun tetapi dari kemiringan garis pengaruh Gambar 5 terlihat tidak banyak mempengaruhi perubahan kuat tekan mortar. Penelitian Fansuri dkk. (2008) pada konsentrasi antara 8 M dan 10 M menghasilkan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH dapat meningkatkan kuat tekan, namun pada jumlah yang berlebih akan memperlemah solidifikasi geopolimer. Kosnatha dan Utomo (2007) mendapatkan nilai optimum konsentrasi NaOH sebesar 8 M untuk menghasilkan kuat tekan maksimum. Hasil sebaliknya oleh Mishra dkk. (2008) dan Hardjito (2005) pada konsentrasi 8 M dan 14 M bahwa konsentrasi NaOH bertambah maka kuat tekan meningkat.

### 4. Pengaruh rasio *waterglass*/NaOH terhadap kuat tekan

Fungsi *waterglass* untuk menambah kandungan oksida  $\text{SiO}_2$  agar ikatan geopolimer bertambah kuat, dalam penelitian ini kuat tekan maksimum didapatkan dengan nilai optimum rasio *waterglass*/NaOH sebesar 2. Peningkatan rasio *waterglass*/NaOH di atas 2 maka kuat tekan lebih rendah dalam Gambar 5. Kemungkinan disebabkan perbandingan kandungan  $\text{SiO}_2$  dalam *waterglass* sudah maksimal yang dapat terikat atau di atas rasio 2 sebagian besar NaOH sudah bereaksi dahulu dengan *waterglass* sehingga tersisa NaOH lebih sedikit yang mengaktivasi *fly ash*. Ekawati dan Atmaja (2010) menunjukkan rasio *waterglass*/NaOH 1,5 merupakan nilai optimum dan penambahan rasio akan menurunkan kuat tekan geopolimer jika urutan pengadukan bahan adalah *fly ash* ditambah larutan gabungan NaOH-*waterglass*. Sedangkan penambahan rasio *waterglass*/NaOH di atas 1,5 akan meningkatkan kuat tekan jika urutan adalah *fly ash*-NaOH diaduk 30 menit lalu ditambahkan *waterglass*. Mortar geopolimer Sathonsaowaphaka dkk. (2009) juga memiliki rasio *waterglass*/NaOH optimum pada 1,5 kuat tekan maksimum 48 MPa, penambahan rasio menyebabkan adukan kental, sukar diaduk dan dicetak sehingga kuat tekan turun. Nilai optimum *waterglass*/NaOH Kosnatha dan Utomo (2007) sebesar 2. Sedangkan Hardjito (2005), semakin besar *waterglass*/NaOH maka kuat tekan meningkat.

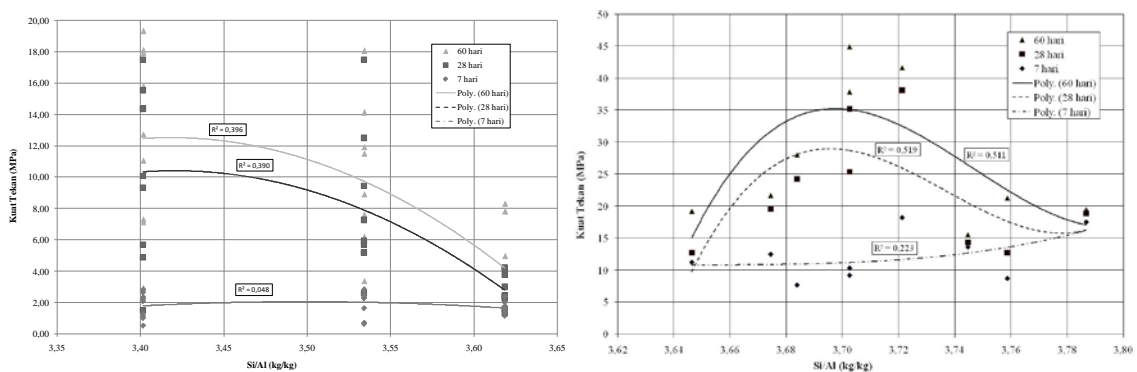


Gambar 5. Pengaruh konsentrasi NaOH terhadap kuat tekan mortar A (kiri) dan pengaruh *waterglass*/NaOH terhadap kuat tekan mortar B (kanan)

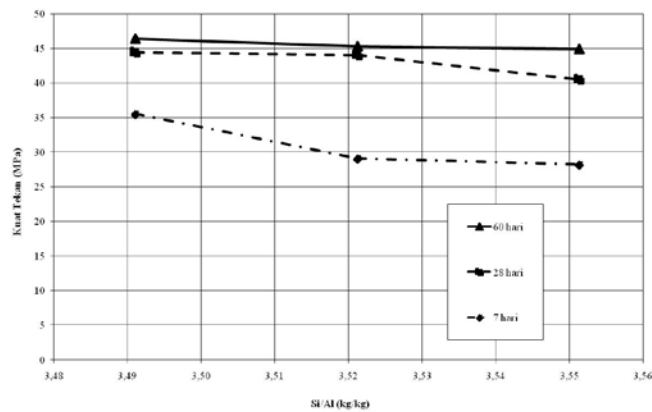
### 5. Pengaruh rasio Si/Al terhadap kuat tekan

Semakin besar rasio Si/Al gabungan *fly ash* dan tailing mortar A, kuat tekan berkurang seperti Gambar 6 tetapi berlawanan dengan analisa pengaruh jumlah tailing Gambar 2. Jumlah Si dan Al dalam tailing cukup besar tetapi penambahan proporsi tailing kemungkinan tidak banyak yang bereaksi membentuk ikatan dalam mortar geopolimer. Pengaruh tailing tersebut seperti hasil penelitian Puspita dan Ririn (2008), pasta geopolimer tailing aktivasi NaOH dan *waterglass* dengan *curing* 100 °C selama 72 jam menghasilkan kuat tekan maksimum yang kurang signifikan sebesar 3,2 MPa. Kandungan SiO<sub>2</sub> dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dalam *fly ash* lebih banyak berperan, berkurangnya persentase berat *fly ash* sebagai bahan pengikat dalam campuran diikuti dengan penurunan kuat tekan.

Larutan *waterglass* yang berfungsi untuk menambah kandungan Si banyak mempengaruhi kuat tekan mortar B. Rasio Si/Al memiliki pengaruh signifikan setelah reaksi terjadi 28 hari seperti Gambar 9 dengan nilai optimum sekitar 3,70 hingga 3,72. Komposisi berat Si/Al campuran beton C antara 3,49 hingga 3,55, semakin besar Si/Al maka kuat tekan beton turun seperti Gambar 7. Rentang rasio Si/Al dan kecenderungan perubahan kuat tekan beton C mirip dengan mortar A Gambar 6. Semakin lama umur beton maka selisih penurunan kuat tekan makin berkurang, pada variasi umur 60 hari tidak sebesar pada umur 7 dan 28 hari.



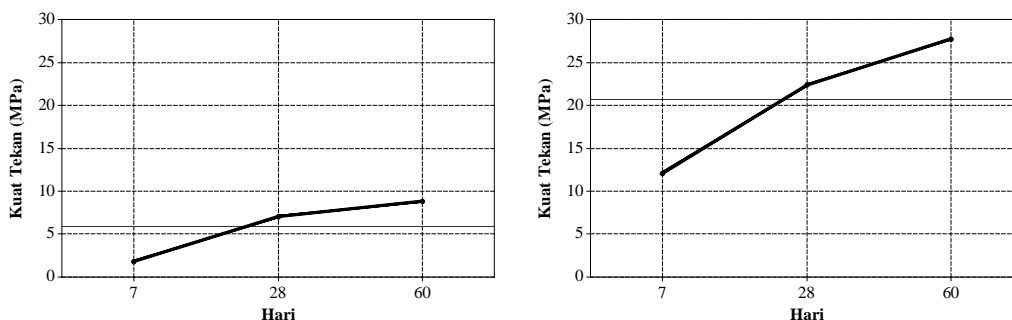
Gambar 6. Pengaruh Si/Al terhadap kuat tekan mortar A (kiri) dan pengaruh Si/Al terhadap kuat tekan mortar B (kanan)



Gambar 7. Pengaruh Si/Al terhadap kuat tekan beton C

## 6. Pengaruh umur terhadap kuat tekan

Umur mortar A bertambah maka kuat tekan meningkat signifikan dan Gambar 8 terlihat faktor umur hingga 60 hari memiliki pengaruh yang besar terhadap kuat tekan karena laju proses kimia yang terjadi memerlukan waktu. Pengaruh tersebut juga yang didapatkan dari penelitian Mishra dkk. (2008), semakin lama waktu *curing* maka kuat tekan bertambah. Pengaruh umur terhadap kuat tekan mortar A, B, dan beton C tidak berbeda. Peningkatan kekuatan dari 7, 28, dan 60 hari semakin kecil tetapi karena batasan umur penelitian sehingga belum dapat ditentukan umur mortar yang sudah memiliki kuat tekan yang relatif konstan.



Gambar 8. Pengaruh umur hari terhadap kuat tekan mortar A dan B

## C. Karakteristik Jangka Pendek Sifat Mekanik Dan Rancang Campur Optimal Mortar Dan Beton Geopolimer Dengan Agregat Tailing

### 1. Kuat tekan mortar geopolimer dengan aktivator NaOH

Hasil uji kubus mortar A merupakan rata-rata tiga buah benda uji tiap variasi campuran umur 7, 28, dan 60 hari. Sebagai pembandingan kuat tekan mortar normal (PC : tailing) umur 28 hari fas 0,5 dengan perbandingan (1 : 2) sebesar 20,49 MPa, perbandingan (1 : 3) sebesar 13,83 MPa, dan perbandingan (1: 4) sebesar 10,80 MPa.

Tabel 1. Kekuatan tekan mortar geopolimer A

Kode	Fly ash (FA)	Tailing	Aktivator /FA	NaOH (M)	Kuat Tekan (MPa)		
					7 hari	28 hari	60 hari
A 2	1	2,0	0,3	<b>10</b>	<b>1,31</b>	<b>17,50</b>	<b>19,33</b>
A 4	1	2,0	0,4	<b>8</b>	<b>2,84</b>	14,37	17,93
A 14	1	3,0	0,4	<b>10</b>	2,53	<b>17,50</b>	18,07

Nilai kuat tekan terbesar umur 7 hari pada campuran A4, tetapi umur 28 dan 60 hari pada campuran A2 dengan konsentrasi NaOH yang lebih tinggi. Kemungkinan karena proses reaksi dengan konsentrasi lebih besar akan mengaktifkan lebih banyak silika dari *fly ash* sehingga menghasilkan ikatan yang lebih banyak dan proses tersebut membutuhkan waktu cukup lama. Kuat tekan mortar maksimum pada umur 28 hari untuk perbandingan *fly ash* dengan tailing (1 : 2) dan (1 : 4) lebih kecil daripada kuat tekan mortar normal sedangkan (1 : 3) lebih besar daripada kuat tekan mortar normal sehingga tidak diperlukan rancang campur ulang. Mortar geopolimer rasio aktivator/*fly ash* 0,4, konsentrasi NaOH 10 M dapat digunakan untuk mengganti mortar semen tailing pada rasio *fly ash* : tailing sebesar (1 : 3) dengan kuat tekan 27% lebih besar. Mortar geopolimer A dapat digunakan untuk pekerjaan pasangan dinding berdasarkan SNI 03-6882-2002, campuran A2 dan A14 termasuk dalam tipe M dengan kuat tekan minimal 17,2 MPa.

Optimasi rancang campur dilakukan dengan menggunakan nilai kuat tekan Tabel 1. Kuat tekan maksimal umur 28 hari pada campuran A2 dan A14 tetapi kuat tekan maksimal umur 60 hari pada campuran A2 diikuti campuran A14. Pembuatan benda uji selanjutnya mortar B menggunakan dasar campuran A14 dengan pertimbangan :

- a) proporsi campuran (*fly ash* : tailing) pada campuran A14 (1 : 3) lebih banyak daripada campuran A2 (1 : 2) tetapi kuat tekan umur 28 hari setara;
- b) kuat tekan umur 60 hari pada campuran A14 (18,07 MPa) lebih kecil tetapi tidak beda jauh dengan campuran A2 (19,33 MPa).

## 2. Kuat tekan mortar geopolimer dengan aktivator NaOH dan *waterglass*

Kuat tekan mortar meningkat signifikan hingga 49% setelah penambahan aktivator *waterglass* dalam Tabel 3 terhadap mortar A14 dan A17. Perbandingan yang digunakan hasil kuat tekan A14 dan A17 pada rasio aktivator/*fly ash* 0,4 dan 0,5 sedangkan rasio 0,3 tidak dilakukan seperti mortar A karena pada mortar B menghasilkan adukan yang sangat kering. Hal tersebut akibat porsi jumlah NaOH yang berkurang sedangkan tambahan *waterglass* yang lebih kental daripada NaOH tidak seimbang menjaga kelecakan adukan. Penambahan rasio aktivator/*fly ash* sebesar 0,6 dilakukan untuk mengetahui pengaruh pada rasio tinggi.

Tabel 3. Kekuatan tekan mortar geopolimer B

Kode	Fly ash (FA)	Tailing	Aktivator/ /FA	NaOH (M)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> / NaOH	Kuat Tekan (MPa)		
						7 hari	28 hari	60 hari
A 14	1	3,0	0,4	10	0	2,53	17,50	18,67
B 1					1	11,20	12,73	19,20
B 2					2	7,63	24,27	28,00
B 3					3	9,17	25,40	37,87
A 17	1	3,0	0,5	10	0	7,33	25,67	34,00
B 4					1	12,47	19,60	21,67
B 5					2	<b>18,23</b>	<b>38,13</b>	41,67
B 6					3	13,60	14,37	15,53
B 7	1	3,0	0,6	10	1	10,30	35,20	<b>44,93</b>
B 8					2	8,67	12,73	21,27
B 9					3	17,53	18,87	19,47

Optimasi rancang campuran selanjutnya beton C menggunakan nilai kuat tekan Tabel 3. Nilai kuat tekan maksimum umur 7 dan 28 hari pada campuran B5 tetapi kuat tekan umur 60 hari lebih rendah daripada kuat tekan campuran B7. Campuran dasar pembuatan beton C ditentukan campuran B5 karena memiliki kuat tekan maksimum pada umur 28 hari. Mortar geopolimer B dapat digunakan untuk pekerjaan pasangan dinding berdasarkan SNI 03-6882-2002, campuran B5 dan B7 termasuk dalam tipe M dengan kuat tekan minimal 17,2 MPa

### 3. Kuat tekan beton geopolimer dengan aktivator NaOH dan *waterglass*

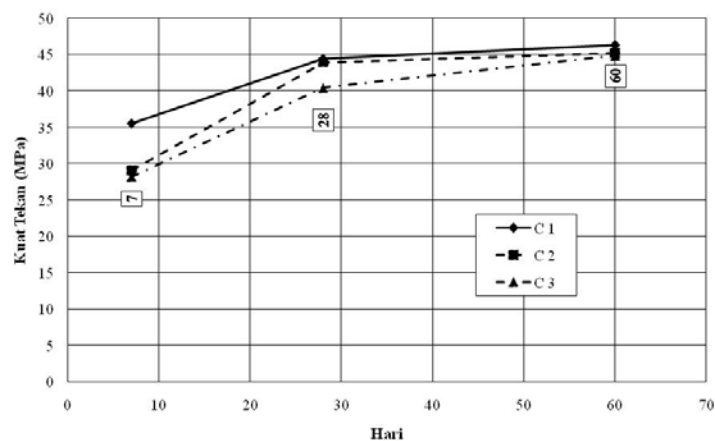
Hasil uji silinder beton C terdapat dalam Tabel 5 rata-rata tiga buah benda uji dari tiap variasi campuran umur 7, 28, dan 60 hari. Beberapa nilai kuat tekan dicetak tebal untuk menunjukkan nilai terbesar pada masing-masing umur beton. Kuat tekan maksimum beton geopolimer dicapai campuran C1 variasi 7, 28, dan 60 hari. Kuat tekan campuran mortar B2 dan B5 meningkat signifikan dengan adanya tambahan split menjadi campuran beton C1 dan C3.

Tabel 5. Kekuatan mortar dan beton geopolimer aktivator NaOH dan *waterglass*

Kode	Fly ash : Agregat		Aktivator /FA	NaOH (M)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /NaOH	Kuat Tekan (MPa)		
	Tailing	Split				7 hari	28 hari	60 hari
B 2	100	0	0,4	10	2	7,63	24,27	28,00
C 1	43	57	0,4	10	2	<b>35,51</b>	<b>44,42</b>	<b>46,33</b>
C 2	43	57	0,45	10	2	29,08	43,99	45,27
B 5	100	0	0,5	10	2	18,23	38,13	41,67
C 3	43	57	0,5	10	2	28,21	40,43	44,84

Campuran beton dengan rasio aktivator/fly ash 0,45 tidak memiliki pembanding kuat tekan mortar. Tetapi secara umum kuat tekan kubus mortar (5 x 5 x 5) cm<sup>3</sup> tidak dapat dibandingkan langsung dengan silinder beton diameter 10 cm tinggi 20 cm karena faktor bentuk yang berbeda. Rasio aktivator/fly ash untuk kuat tekan maksimum pada mortar sebesar 0,5 sedangkan pada

beton sebesar 0,4 kemungkinan karena permukaan agregat mortar lebih luas dibanding agregat beton karena adanya split dan jumlah tailing yang berkurang. Kuat tekan beton geopolimer minimal umur 7 hari pada Tabel 5 sebesar 28,21 MPa didapatkan dengan metode perawatan suhu ruang, tetapi Hardjito (2005) untuk kuat tekan umur 7 hari sebesar 29 MPa memerlukan metode *curing oven* suhu 30°C selama 24 jam.



Gambar 9. Perbandingan kuat tekan beton C

Laju perubahan kuat tekan beton geopolimer dengan metode perawatan suhu ruang pada penelitian ini tidak berbeda jauh dengan beton normal, antara umur 7 dan 28 hari selisih kuat tekan cukup besar lalu setelah 28 hari tidak banyak perbedaan. Hardjito (2005) menunjukkan hasil berbeda, kuat tekan tidak dipengaruhi faktor umur. Laju perubahan kuat tekan beton geopolimer setelah 7 hari tidak berbeda jauh dengan kuat tekan 28 dan 60 hari karena Hardjito (2005) menggunakan metode *curing* dengan suhu tinggi.

#### 4. Kemudahan pengerjaan (*workability*) beton geopolimer

Campuran C1 dengan faktor aktivator/*fly ash* 0,4 mengalami sedikit penurunan setelah kerucut slump diangkat tetapi penurunan tidak berhenti hingga akhirnya terjadi *collapse* slump sebesar 203 mm. Campuran C2 dan C3 juga mengalami hal serupa tetapi dengan laju penurunan yang lebih cepat hingga 223 dan 228 mm. Karakteristik kehalusan butiran tailing sebagai agregat halus, bentuk butiran bulat *fly ash* sebagai pengganti 100% semen, dan *waterglass* yang licin diperkirakan memberikan pengaruh besar pertambahan nilai slump. Pengaruh jumlah aktivator/*fly ash* cukup besar terhadap penambahan nilai slump. Nilai slump minimal sebesar 203 mm didapatkan tanpa penambahan air ekstra, sedangkan penelitian Hardjito (2005) nilai slump lebih dari 200 mm dihasilkan setelah penambahan air ekstra sebanyak 20,7 kg/m<sup>3</sup>. Slump yang besar indikasi beton dapat mengalami segregasi, tetapi adukan beton geopolimer dalam penelitian ini memiliki kohesi yang cukup besar dan lengket.



## 5. Kerapatan, penyerapan, dan kadar rongga

Hasil pengukuran dan perhitungan dari mortar geopolimer A dan B menunjukkan kerapatan berkisar antara  $2003 \text{ kg/m}^3$  sampai dengan  $2498 \text{ kg/m}^3$  termasuk dalam kategori normal yang berkisar antara 2100 hingga  $2500 \text{ kg/m}^3$ . Penyerapan air beton C cukup rendah walaupun sudah direndam dalam air 48 jam dan direbus 5 jam, dapat disebut kedap air karena di bawah resapan maksimum 6,5% setelah direndam dalam air selama 24 jam menurut SNI 03-2914-1990. Kerapatan beton C antara 2217 hingga  $2342 \text{ kg/m}^3$  termasuk beton normal berkisar antara 2100 hingga  $2500 \text{ kg/m}^3$ .

Volume rongga permeabel cukup besar antara 8,79% hingga 9,39% sehingga cara pemadatan standar dengan penusukan kurang efektif karena adukan cukup kental dan lengket walaupun adukan mampu untuk menyebar tanpa perlakuan. Jumlah penusukan dan lapisan pemadatan yang lebih banyak atau pemadatan dengan penggetaran dianjurkan.

## 6. Modulus elastisitas beton geopolimer

Hasil perhitungan modulus elastisitas yang didapatkan dari pengukuran tegangan dan regangan hingga 40% beban maksimum terdapat dalam Tabel 7 disertai pendekatan nilai modulus elastisitas beton normal SNI 03-2847-2002 dengan rumus  $4700/f_c'$ . Hardjito (2005) bahwa semakin besar tegangan maksimum maka semakin besar modulus elastisitas serupa dengan kecenderungan yang didapatkan dari perhitungan SNI 03-2847-2002. Kecenderungan pengaruh tegangan maksimum terhadap modulus elastisitas tidak terlihat jelas dari benda uji beton C. Kemungkinan disebabkan keterbatasan jumlah data sehingga kecenderungan belum terlihat jelas. Regangan saat beban puncak beton geopolimer Hardjito (2005) berkisar antara 0,0024 hingga 0,0026 tidak berbeda jauh dengan nilai Tabel 7 yang berkisar antara 0,0020 hingga 0,0027.

Tabel 7. Modulus elastisitas beton geopolimer

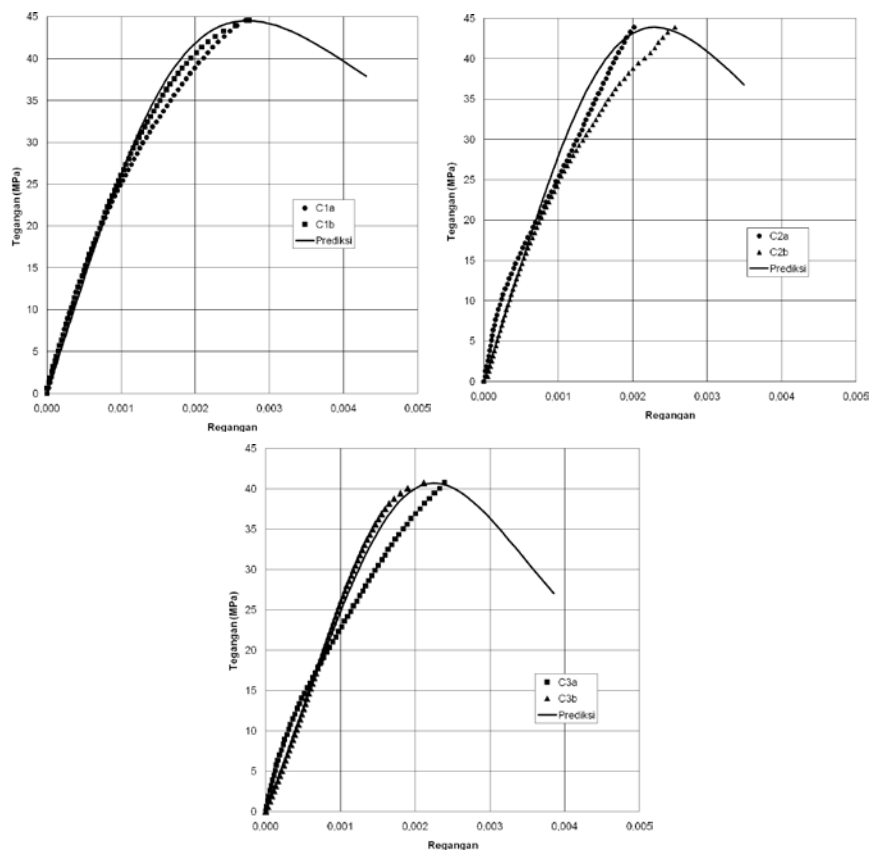
Kode	Regangan Puncak	E (GPa)	E Rata-rata (GPa)	E SNI 03-2847-2002 (GPa)	Tegangan Maks (MPa)
C 1	0,002676	28,20	27,72	31,37	44,55
	0,002726	27,25			
C 2	0,002020	29,53	29,39	31,14	43,91
	0,002565	29,23			
C 3	0,002391	24,87	25,34	29,99	40,72
	0,002116	25,80			

Perhitungan modulus elastisitas hasil penelitian lebih rendah daripada perhitungan SNI 03-2847-2002 karena perbedaan jenis material antara beton geopolimer dan beton normal.

Penelitian Hardjito (2005) juga menghasilkan modulus elastisitas beton geopolimer yang setara dengan beton normal tetapi lebih rendah daripada rumus standar perkiraan modulus elastisitas metode ACI.

## 7. Hubungan tegangan-regangan uji tekan beton geopolimer

Pengukuran tegangan regangan silinder beton hanya dilakukan hingga beban maksimum karena penurunan beban setelah puncak cukup cepat, tidak dapat diikuti pembacaan regangan strain gage merk Tokyo Sokki Kenkyujo yang menempel kedua sisi silinder. Bentuk kurva hasil pengujian tidak berbeda jauh antar campuran yang berbeda rasio aktivator/*fly ash*. Gradasi kemiringan kurva C2 dan C3 terlihat berbeda dengan kurva C1, kemungkinan disebabkan silinder C2 dan C3 memiliki kadar rongga yang lebih banyak daripada silinder C1. Persamaan Carreira dan Chu cukup mendekati kurva tegangan regangan hasil uji hingga kuat tekan maksimum dalam Gambar 10. Kesimpulan serupa Hardjito (2005) bahwa fungsi hubungan tegangan-regangan beton geopolimer dapat menggunakan konsep beton normal.



Gambar 10. Kurva tegangan – regangan beton geopolimer C1, C2, dan C3

## 8. Kuat lentur beton geopolimer

Kuat lentur maksimum dihasilkan dari campuran C2 dalam Tabel 8, tetapi selisih kekuatan dengan campuran lain tidak signifikan. Nilai kuat tarik lentur umur 28 hari lebih dari 5,90 MPa dan dapat diaplikasikan untuk perkerasan jalan, menurut Pd T-05-2004-B kuat tarik lentur 28 hari minimal yang diperlukan sebesar 4 MPa. Penggunaan lebih awal pada umur 14 hari dapat dilakukan karena sudah lebih dari 4,59 MPa.

Pembukaan untuk lalu lintas umum berdasarkan kuat tekan 28 hari disyaratkan Pd T-05-2004-B sebesar 27,6 MPa untuk tebal pelat paling tipis 12,5 cm, sedangkan kuat tekan beton C umur 7 hari Tabel 8 sudah dicapai minimal 28,2 MPa sehingga dapat digunakan lebih awal. Perkiraan modulus keruntuhan lentur beton normal SNI 03-2847-2002 dengan rumus  $0,7\sqrt{f_c}$  menghasilkan nilai lebih rendah daripada hasil pengujian dalam Tabel 8 karena jenis beton yang berbeda tetapi dapat dijadikan perkiraan secara konservatif. Perumusan hubungan kuat tekan dengan kuat lentur beton geopolimer yang lebih akurat sebaiknya dilakukan dengan jumlah data statistik yang besar.

Tabel 8. Kuat lentur beton geopolimer

Kode	Aktivator/ FA	MOR (MPa)		SNI 03-2847-2002 (MPa)
		14 hari	28 hari	28 hari
C 1	0,4	4,59	5,90	4,67
C 2	0,45	5,34	6,65	4,64
C 3	0,5	4,87	6,03	4,45

(*fly ash* : tailing) = (1 : 3); NaOH 10M; Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/NaOH = 2

## KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

- Kontribusi berbagai faktor pengaruh dalam rancang campur terhadap sifat mekanik adalah :
  - semakin banyak jumlah tailing, konsentrasi NaOH, maka kuat tekan berkurang;
  - rasio aktivator/*fly ash*, *waterglass*/NaOH, rasio Si/Al memiliki nilai optimum;
  - umur mortar semakin bertambah maka kuat tekan akan meningkat signifikan.
- Karakteristik jangka pendek sifat mekanik mortar dan beton geopolimer adalah :
  - mortar rasio aktivator/*fly ash* 0,4, konsentrasi NaOH 10 M dapat digunakan untuk mengganti mortar semen tailing pada rasio *fly ash* : tailing sebesar (1 : 3);
  - kuat tekan beton 7 hari sebesar 28,21 MPa dapat dicapai dengan *curing* suhu ruang;

- c. kuat tarik lentur 28 hari dapat diaplikasikan untuk perkerasan jalan, penggunaan lebih awal pada umur 14 hari dapat dilakukan.
3. Rancang campur optimal dengan sifat mekanik yang memenuhi syarat untuk beton adalah komposisi *fly ash* : agregat sebesar 1 : 3, tailing : split sebesar 43 : 57, aktivator/*fly ash* sebesar 0,4, NaOH sebesar 10 M,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$  sebesar 2 dengan kuat tekan dan kuat tarik lentur 28 hari hingga 44,42 MPa dan 5,90 MPa .

### B. Saran

Penggunaan jenis aktivator yang berbeda dan lebih ramah dibandingkan larutan NaOH yang korosif. Metode pencampuran bahan, pemadatan, dan perawatan yang berbeda. Kemungkinan dapat dikembangkan untuk *self compacted concrete* atau mortar sebagai bahan *grouting*. Penerapan campuran mortar geopolimer untuk aplikasi komponen bangunan seperti *paving block*, batu bata beton pejal, genteng beton, panel, dan *hollow brick*. Aplikasi beton geopolimer dalam struktur beton bertulang. Karakteristik jangka panjang setelah 60 hari.

### DAFTAR PUSTAKA

- Davidovits, J., 2001, *30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications, Market Trends and Potential Breakthroughs*, Geopolymer 2002 Conference, Melbourne.
- Ekawati, D., dan Atmaja, L., 2010, *Studi Perbandingan Sintesis Geopolimer Secara Normal Dan Terpisah Dari Abu Layang Pltu Suralaya*, Prosiding Skripsi Semester Genap 2010/2011, SK-091304, FMIPA ITS, Surabaya.
- Fansuri, H., Swastika, N., dan Atmaja, L., 2008, *Pembuatan dan Karakterisasi Geopolimer dari Bahan Abu Layang PLTU Paiton, Akta Kimindo Vol. 3 No. 2 April 2008 :61 – 66*.
- Hardjito, D., 2005, *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*, Doctor of Philosophy Thesis, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- Kosnatha, S., dan Utomo, J.P., 2007, *Komposisi dan Karakteristik Beton Geopolimer dari Fly Ash Tipe C dan Tipe F*, Universitas Kristen Petra, Surabaya.
- Mishra, A., Choudhary, D., Jain, N., dan Dutt, D., 2008, *Effect Of Concentration Of Alkaline Liquid And Curing Time On Strength And Water Absorption Of Geopolymer Concrete*, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences Vol. 3 No. 1 February 2008.
- Pd T-05-2004, *Pelaksanaan Perkerasan Jalan Beton Semen*, Badan Litbang Kementerian Pekerjaan Umum
- Puspita, Y., dan Ririn, R.A., 2008, *Pemanfaatan Tailing Penambangan Bijih Tembaga sebagai Bahan Baku Geopolimer*, Skripsi, Program Studi Teknik Kimia - Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Radhakrishna, Shashishankar, A., Udayashankar, B.C., dan Devi, M.V.R., 2010, *Compressive Strength Assessment of Geopolymer Composites by a Phenomenological Model*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 29, No. 6/2010, SAGE Publications.
- Sathonsaowaphaka, A., Chindaprasirt, P., dan Pimraksab, K., 2009, *Workability And Strength Of Lignite Bottom Ash Geopolymer Mortar*, Journal of Hazardous Materials 168.
- Tjokrodimuljo, K., 2007, *Teknologi Beton*, Biro Penerbit Teknik Sipil Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.