

## KUAT TARIK LENTUR BETON GEOPOLYMER BERBASIS ABU TERBANG (FLY ASH)

Filia Eunike Sofia Paat

Steenie E. Wallah, Reky S. Windah

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi Manado

Email: [paatfilia@gmail.com](mailto:paatfilia@gmail.com)

### ABSTRAK

Tulisan ini membahas tentang beton geopolimer berbasis abu terbang (fly ash). Fly ash yang digunakan adalah produk sampingan industri yang dihasilkan dari pembakaran batu bara pada PLTU Amurang. Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan kuat tarik lentur beton geopolimer melalui pengujian di laboratorium. Metode pengujian yang digunakan adalah System Two Point Loading Test pada benda uji balok dengan ukuran 10cm x 10cm x 50cm.

Produk penelitian yang telah dilakukan adalah grafik hubungan antara kuat tarik lentur beton terhadap curing time dengan variasi waktu 4 jam, 8 jam, 12 jam dan 24 jam pada temperatur 60°C dengan menggunakan oven.

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa, nilai kuat tarik lentur meningkat seiring dengan lamanya curing time. Kuat tarik lentur maksimum terjadi pada curing time selama 24 jam.

Kata kunci : beton geopolimer, fly ash, curing time, kuat tarik lentur.

### PENDAHULUAN

#### Latar Belakang

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi membawa pengaruh yang signifikan terhadap semua aspek kehidupan manusia. Termasuk diantaranya di bidang konstruksi teknik sipil. Dalam bidang konstruksi, beton merupakan salah satu elemen yang paling mendapat perhatian. Beton sangat populer dan umum digunakan untuk membangun berbagai infrastruktur di kalangan masyarakat.

Beton Konvensional terdiri atas agregat kasar, agregat halus, Semen Portland (SP), dan air. Beton jenis ini umum ditemui di masyarakat dan dapat diproduksi dengan metode sederhana. Seiring dengan meningkatnya penggunaan material beton, terdapat beberapa faktor penting yang harus diperhatikan antara lain keawetan material beton (durabilitas) dan isu global tentang kerusakan lingkungan akibat produksi Semen Portland.

Beberapa tahun belakangan ini, para ahli material konstruksi bangunan melakukan berbagai penelitian tentang beton. Salah satu penelitian yang dilakukan adalah tentang Beton Geopolymer. Beton Geopolymer adalah beton yang dibuat tanpa menggunakan semen portland sebagai bahan pengikat, sebagai pengganti semen Portland digunakan fly ash dicampur dengan alkalin aktivator. Beton Geopolymer dengan

bahan dasar fly ash merupakan beton yang ramah lingkungan (*environmentally friendly*).

Fly ash adalah material hasil sampingan (*by-product*) industri, dalam hal ini dihasilkan dari pembakaran batu bara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Abu terbang dikategorikan dalam material "pozzolon" yakni material siliceous atau aluminous yang didalamnya terdapat sedikit sekali atau tidak sama sekali material cementious seperti yang ada pada semen Portland. Material ini dapat bereaksi secara kimia dengan cairan alkalin pada temperatur tertentu untuk membentuk material campuran yang memiliki sifat seperti semen.

Ditinjau dari segi mekaniknya, beton mempunyai kuat tarik yang relatif lebih rendah dari kuat tekannya. Presentase kekuatan tarik beton sekitar 10% - 15% terhadap kekuatan tekannya. Untuk menanggulangi kelemahan pada beton ini maka digunakan tulangan baja. Walaupun kuat tarik beton tidak digunakan dalam perencanaan beton bertulang, namun kuat tarik beton berperan dalam meminimalisir retak-retak pada beton sehingga tidak terjadi korosi pada tulangan baja yang disebabkan oleh air yang masuk.

#### Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, maka penulis akan mengadakan penelitian mengenai berapa

besar nilai kuat tarik lentur pada beton *geopolymer* berbasis abu terbang (*fly ash*).

### Pembatasan Masalah

Mengingat keterbatasan waktu dan biaya pelaksanaan penelitian, maka pembatasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Bahan pembentuk beton sebagai berikut:
  - a. *Fly Ash* yang digunakan adalah abu terbang dari PLTU Amurang.
  - b. Cairan Alkalin yaitu kombinasi cairan *sodium silikat* dan *sodium hidroksida*.
  - c. *Superplastisizer* digunakan *Viscocrete-10* dengan merk dagang Sika®.
  - d. Agregat kasar yang dipakai adalah batu pecah dari Tateli.
  - e. Agregat halus yang dipakai adalah pasir dari Girian.
  - f. Air yang digunakan adalah air yang berasal dari sumur Fakultas Teknik UNSRAT.
2. Benda uji beton untuk kuat tarik lentur berbentuk balok dengan ukuran 10cm x 10cm x 50cm.
3. Perawatan (*curing*) benda uji menggunakan oven dengan *curing temperature* 60°C dengan variasi *curing time* selama 4 jam, 8 jam, 12 jam, 24 jam.
4. Pengujian kuat tarik lentur pada umur beton 7 hari.

### Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan nilai kuat tarik lentur dari beton *geopolymer* berbasis abu terbang (*fly ash*).
2. Untuk mendapatkan perbandingan kuat tarik lentur terhadap kuat tekan beton *geopolymer* berbasis abu terbang (*fly ash*).

### Manfaat Penelitian

Dari penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat bagi perkembangan teknologi beton, antara lain sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat menjadi salah satu sumber informasi tentang pembuatan beton *geopolymer* berbasis abu terbang (*fly ash*).
2. Hasil penelitian ini dapat memberikan informasi tentang kekuatan tarik lentur beton *geopolymer* dengan bahan dasar abu terbang (*fly ash*).

## LANDASAN TEORI

### Pendahuluan

Davidovits (Sumajouw dan Dapas, 2013) memperkenalkan istilah "*geopolymer*" pada tahun 1978 sebagai gambaran bahwa mineral polymer tersebut adalah hasil ilmu geokimia. *Geopolymer* adalah bentuk anorganik alumina-silika yang disintesa melalui material banyak mengandung Silika (Si) dan alumina (Al) yang berasal dari alam atau dari material hasil sampingan industri. Komposisi kimia material *geopolymer* serupa dengan Zeolit, tetapi memiliki mikrostruktur amorphous. Selama proses sintesa, atom silika dan alumina menyatu dan membentuk blok yang secara kimia memiliki struktur yang mirip dengan batuan alam.

### Material Penyusun

Material polimer anorganik alkali aluminosilikat dapat disintesis dari komponen solid yang mengandung alumina dan silika berkonsentrasi tinggi. Komponen solid adalah bahan utama pembentuk polimer. Komponen solid tersebut dapat berupa mineral alami maupun limbah industri. Unsur-unsur kimia di dalam komponen solid bila dicampur dengan larutan alkali sebagai komponen aktivator, akan menghasilkan material pasta *geopolymer* dengan kekuatan mengikat seperti pasta semen. Komponen solid dan aktivator akan bersintesa membentuk material padat melalui proses polimerisasi, dimana proses polimerisasinya yang terjadi adalah disolusi dan diikuti dengan proses polikondensasi.

Dalam penelitian ini, bahan pengikat beton *geopolymer* adalah sistem anorganik 2 komponen yang terdiri atas komponen solid yang memiliki kandungan silika (Si) dan alumina (Al) yaitu *fly ash* dan komponen activator yang berupa sodium silikat dan sodium hidroksida.

### *Fly Ash*

Abu terbang (*Fly Ash*) adalah material yang berasal dari sisa pembakaran batu bara. Abu terbang merupakan salah satu material yang digunakan untuk membuat bahan pengikat (*binders*) pada beton *geopolimer*. Abu terbang dikategorikan dalam material "POZZOLON" yakni material siliceous atau aluminous yang di dalamnya terdapat sedikit sekali atau tidak sama sekali material *cementious* sebagaimana yang dimiliki Semen Portland. Sebagian besar komposisi kimia dari *fly ash* tergantung pada tipe batu bara.

*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).

- Kadar ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) > 50%
- 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.

- Kadar ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) > 70%
- 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.

**Alkalin Aktivator (Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida)**

Kombinasi cairan sodium silikat dan sodium hidroksida digunakan untuk membantu terjadinya reaksi kimia dengan aluminium dan silika yang terdapat pada abu terbang. Sodium hidroksida yang digunakan sebagai alkalin activator, berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam abu terbang dan kapur sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat, sedangkan sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi.

**Bahan Tambahan (Superplasticizer)**

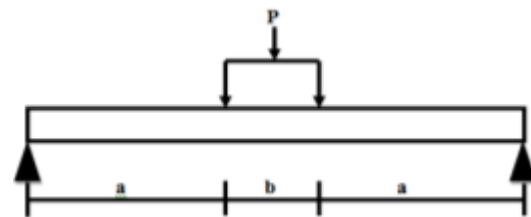
*Superplasticizer* adalah bahan kimia tambahan yang digunakan sebagai salah satu cara meningkatkan kemudahan pelaksanaan pekerjaan pengecoran (*workability*) beton dengan menggunakan air sesedikit mungkin. Penggunaan *superplasticizer* mulai dikembangkan di Jepang dan di Jerman pada awal tahun 1960-an.

Dalam penelitian ini *Superplasticizer* yang digunakan adalah *Sika Viscocrete-10* yaitu bahan tambah berupa cairan yang ditambahkan pada campuran beton dalam jumlah tertentu untuk mengubah beberapa sifat beton. Bahan tambah *Sika Viscocrete-10* termasuk tipe F (*Water Reducer & High Range*) yaitu bahan tambah yang berfungsi untuk mengurangi jumlah air pencampur yang diperlukan untuk menghasilkan

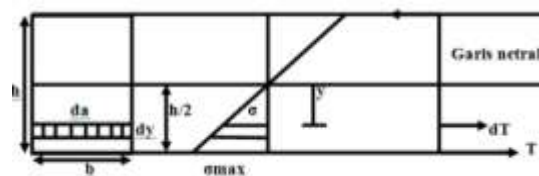
beton dengan konsistensi tertentu dan meningkatkan nilai slump. Dosis yang disarankan adalah 1%-2% dari berat semen. Dosis yang berlebihan akan menyebabkan menurunnya kuat tekan beton.

**Kuat Tarik Lentur Beton**

Sistem pembebanan pada pengujian tarik lentur, yaitu benda uji dibebani sedemikian rupa sehingga hanya akan mengalami keruntuhan akibat lentur murni (*system two point loading*).



Gambar 1. Sistem Pembebanan Dua Titik



Gambar 2. Diagram Tegangan pada Penampang Persegi Panjang

$\sigma_{max}$  adalah tegangan tarik lentur maksimum yang terjadi pada serat paling luar. Jadi, kuat tarik lentur dapat dihitung dengan rumus :

$$f_r = \frac{6M}{bh^2} \quad (1)$$

dimana M adalah momen maksimum didapat dari

$$M = \frac{P}{2} \cdot a \quad (2)$$

Persamaan (2) disubstitusikan ke persamaan (1) didapat

$$f_r = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (3)$$

dimana :

- $f_r$  = Kuat tarik lentur (MPa)
- P = Beban pada waktu runtuh (N)
- L = Panjang bentangan balok (mm)
- b = Lebar penampang balok (mm)
- h = Tinggi penampang balok (mm)

Menurut ASTM, kekuatan tarik,  $f_r$  dari pengujian kuat tarik lentur telah ditemukan sebanding dengan  $\sqrt{f_c'}$  sedemikian sehingga untuk beton berbobot normal :

$$f_r = 0,62\sqrt{f_c'} \text{ MPa} \quad (4)$$

Menurut ACI 363R-23 :

$$f_r = 0,94\sqrt{f_c'} \text{ MPa} \quad (5)$$

untuk  $21 \text{ MPa} < f_c' < 83 \text{ MPa}$

### METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan, diawali dengan studi pustaka yang dilanjutkan dengan penelitian yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Material Bangunan Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi. Adapun tahapan dalam pelaksanaan penelitian ini antara lain:

1. Persiapan alat dan bahan penelitian.
2. Pengujian material penyusun beton *geopolymer*
  - a. *Fly ash*
  - b. Pengujian agregat kasar dan agregat halus
    - Pemeriksaan gradasi
    - Pemeriksaan kadar air
    - Pemeriksaan berat jenis, berat volume, dan absorpsi
    - Pemeriksaan keausan
3. Perencanaan komposisi campuran
4. Pembuatan benda uji
  - a. Pembuatan campuran beton (*mixing*)
  - b. Pemeriksaan slump
  - c. Pencetakan (*moulding*)
5. Perawatan (*curing*)
6. Pemeriksaan berat volume benda uji
7. Pengujian kuat tarik lentur
8. Menganalisa data hasil pengujian yang telah dilakukan.
9. Dibuat kesimpulan terhadap hasil penelitian.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil Pengujian Material

Langkah pertama yang dilakukan sebelum penelitian ini dimulai adalah melakukan pengujian material penyusun geopolimer untuk mengetahui komposisi kimia dari unsur-unsur penyusunnya.

#### Pengujian *Fly Ash*

Material *fly ash* sebagai solid material diuji dengan Metode Analisis Gravimetrik, S.S.A dan Spektrofotometer di Balai Riset dan Standardisasi Industri Manado untuk mengetahui persentase komposisi unsur-unsur yang terkandung dalam *fly ash*, dimana diharapkan sebagian besar unsur penyusun dari *fly ash* adalah unsur alumina dan silika. Hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis Fly Ash

No	Parameter	Hasil Analisis (%)
1	SiO <sub>2</sub>	36.23
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.25
3	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.34
4	CaO	2.85
5	Na <sub>2</sub> O	0.93
6	K <sub>2</sub> O	0.14
7	MgO	0.49
8	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.06
9	Air	0.52

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan pada tanggal 13 Februari 2014, *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini didominasi oleh unsur silika–besi–dan alumina.

Dengan kandungan CaO 2,85 % < 5% sesuai dengan *ACI Manual of Concrete Practice 1993 Part 1 226.3R-3*, maka hasil pemeriksaan *fly ash* termasuk kelas F.

#### Nilai Slump

Salah satu metode yang di gunakan untuk mengetahui *workability* campuran beton adalah dengan cara pemeriksaan nilai slump. Makin besar nilai slump, maka beton semakin mudah untuk dikerjakan.

Tabel 2. Nilai Slump

No	Curing Time (Jam)	Jumlah Benda Uji	Nilai Slump (mm)
1	4	5	20
2	8	5	20
3	12	5	45
4	24	5	25
Rata-rata			27,5

Dalam penelitian ini, nilai slump yang diperoleh cukup rendah, meskipun dosis *superplasticizer* yang digunakan maksimum yaitu 1,5 % dari *binder*. Hal ini kemungkinan besar disebabkan karena cara pencampuran atau mekanisme pencampuran dari beton geopolymer.

Mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Dian Adisty (2008) yang menyatakan bahwa mekanisme pencampuran berpengaruh pada *workability*.

Hasil pengamatan yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa beton cenderung mengalami *early stiffing* (kekakuan terlalu awal). Viskositas beton sangat tinggi mengakibatkan nilai slump yang diperoleh rendah, sehingga berpengaruh pada *workability* dari beton, dimana beton cukup sulit dikerjakan. Dalam pencetakan benda uji dilakukan pemadatan manual dan penggetaran yang cukup lama. Selain itu, kondisi cuaca pada saat pencampuran (*mixing*) dapat berpengaruh pada penguapan air dalam campuran beton.

**Berat Volume Beton**

Dalam penelitian ini, berat volume beton diperoleh dari berat beton umur 7 hari dibagi dengan volume penampang balok ukuran 10 cm x 10 cm x 50 cm.

Tabel 3. Berat Volume Rata-rata

No	Curing Time (Jam)	Curing Temperature (°C)	Berat Volume Rata-rata (kg/m <sup>3</sup> )
1	4	60	2106
2	8	60	2066,4
3	12	60	2092,4
4	24	60	2108

Dari hasil yang diperoleh terlihat bahwa berat volume berkisar antara 2066,4 kg/m<sup>3</sup> - 2108 kg/m<sup>3</sup>, maka hasil pemeriksaan berat volume beton termasuk beton berbobot normal.

**Kuat Tekan**

Hasil pengujian kuat tekan yang dilakukan oleh saudara Riger Manuahe (2014) terhadap benda uji kubus dengan ukuran 15 x 15 x 15 cm dengan *curing temperature* 60°C pada umur 7 hari, dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kuat Tekan Beton Rata-rata

No	Curing Time (Jam)	Curing Temperature (°C)	Kuat Tekan Rata-rata (Mpa)
1	4	60	22.17
2	8	60	22.83
3	12	60	23.41
4	24	60	27.46

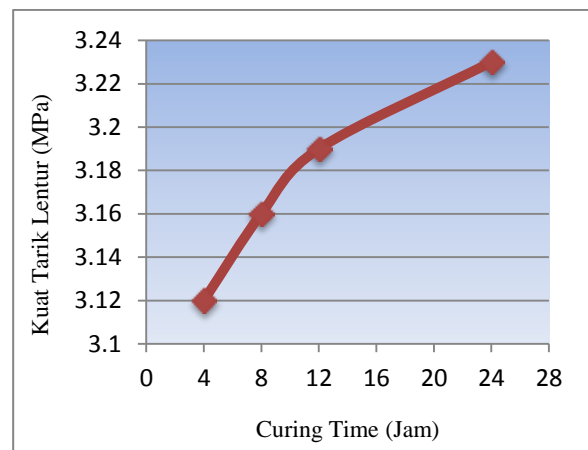
Berdasarkan tabel dapat disimpulkan bahwa lamanya waktu *curing* berpengaruh pada peningkatan kuat tekan beton *geopolymer*. Semakin lama waktu *curing*, semakin tinggi kuat tekan beton. Dimana kuat tekan maksimum yang dihasilkan pada *curing time* selama 24 jam.

**Kuat Tarik Lentur**

Dalam penelitian ini dilakukan tes kuat tarik lentur pada balok beton *geopolymer* dengan ukuran 10 x 10 x 50 cm pada umur 7 hari. Hasil pengujian kuat tarik lentur rata-rata dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Kuat Tarik Lentur Beton Rata-rata

No	Curing Time (Jam)	Curing Temperature (°C)	Kuat Tarik Lentur Rata-rata (Mpa)
1	4	60	3,12
2	8	60	3,16
3	12	60	3,19
4	24	60	3,23



Gambar 3. Grafik Hubungan Kuat Tarik Lentur Beton Terhadap Variasi Curing Time

Dari tabel dan grafik di atas, dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan kuat tarik lentur beton *geopolymer* seiring dengan lamanya waktu perawatan dalam oven (*Curing Time*) pada suhu 60°C. Semakin lama *curing time* pada benda uji beton, semakin tinggi pula kuat tarik lentur beton. Kuat tarik lentur maksimum terjadi pada *curing time* selama 24 jam.

Hubungan kuat tekan rata-rata dan kuat tarik lentur rata-rata beton *geopolymer* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hubungan Kuat Tekan dan Kuat Tarik Lentur Beton

Curing Time (Jam)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Kuat Tarik Lentur Rata-rata (MPa)	Perbandingan Kuat Tarik Lentur terhadap Kuat Tekan	
			ACI/ASTM (MPa)	(%)
4	22.17	3.12	$0.66\sqrt{f_c'}$	14.07
8	22.83	3.16	$0.66\sqrt{f_c'}$	13.84
12	23.41	3.19	$0.66\sqrt{f_c'}$	13.63
24	27.46	3.23	$0.62\sqrt{f_c'}$	11.76

Dalam penelitian ini, persamaan kekuatan tarik lentur menurut ACI/ASTM untuk variasi waktu 4 jam, 8 jam, 12 jam adalah  $0.66\sqrt{f_c'}$  dan untuk variasi waktu 24 jam adalah  $0.62\sqrt{f_c'}$ .

Perbandingan kuat tarik lentur terhadap kuat tekan beton *geopolymer* dalam penelitian ini adalah berkisar antara 11.76 % - 14.07%. Tidak jauh berbeda dengan kuat tarik yang dihasilkan oleh beton konvensional yaitu 10 % - 15 % dari kuat tekannya.

Dari hasil penelitian kuat tarik lentur beton *geopolymer* diperoleh nilai konversi beton pada *curing time* 4 jam, 8 jam, 12 jam, ke 24 jam.

Tabel 7. Tabel Konversi Kuat Tarik Lentur Beton Geopolymer

Curing Time (Jam)	Kuat Tarik Lentur (Mpa)	Nilai Konversi Kuat Tarik Lentur
4	3.12	0.97
8	3.16	0.98
12	3.19	0.99
24	3.23	1.00

## PENUTUP

### Kesimpulan

Dari hasil pengujian, pengolahan data serta analisa, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai kuat tarik lentur beton *geopolymer* meningkat seiring dengan lamanya waktu perawatan (*curing time*).

2. Perbandingan kuat tarik lentur terhadap kuat tekan beton *geopolymer* tidak jauh berbeda dengan kuat tarik yang dihasilkan oleh beton konvensional yaitu 10 % - 15 % dari kuat tekannya.
3. Persamaan kekuatan tarik lentur menurut ASTM/ACI adalah  $0,66\sqrt{f_c'}$  untuk variasi waktu 4 jam, 8 jam, dan 12 jam. Sedangkan untuk 24 jam adalah  $0,62\sqrt{f_c'}$ .

### Saran

Berdasarkan hasil yang didapat dalam penelitian ini, penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut :

1. Perlu diadakan penelitian lanjutan dan lebih teliti mengenai kekuatan beton *geopolymer* dengan menggunakan bahan dasar *fly ash* dengan komposisi yang berbeda.
2. Melakukan penelitian dengan variasi *Curing Temperature* lebih dari 60° C dan *Curing Time* lebih dari 24 jam serta umur beton lebih dari 7 hari untuk mendapatkan kekuatan beton maksimum.
3. Melakukan penelitian lanjutan dengan variasi molar pada cairan sodium hidroksida (NaOH) lebih dari 8 M.
4. Melakukan penelitian tentang mekanisme dan cara pencampuran bahan penyusun beton *geopolymer* dihubungkan dengan *workability* beton.
5. Perlu dipelajari tentang cara perawatan (*curing*) yang tepat untuk mengurangi penguapan air yang berlebihan saat benda uji berada dalam oven, sehingga dapat menanggulangi keretakan-keretakan pada benda uji.
6. Perlu diperhatikan jenis pelumas yang digunakan pada cetakan benda uji, karena beton *geopolymer* memiliki sifat yang cukup lengket.
7. Perlu diadakan penelitian mengenai variasi *mix design* beton *geopolymer* khususnya perbandingan sodium hidroksida dan sodium silikat untuk mendapatkan kekuatan beton yang optimum.

## DAFTAR PUSTAKA

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

- Adisty, D., 2008. *Sintesis Geopolymer Berbahan Baku Abu Terbang ASTM Kelas C*, Skripsi Sarjana Universitas Indonesia, Depok
- Manuahe, Riger., 2014. *Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash)*, Skripsi Sarjana Universitas Sam Ratulangi, Manado
- Sumajouw, D.M.J., Dapas, S.O., 2013. *Elemen Struktur Beton Bertulang Geopolymer*, Penerbit Andi, Yogyakarta