

**PENGARUH MOLARITAS NaOH PADA SIFAT  
MEKANIK DAN KARAKTERISASI GEOPOLIMER  
BERBASIS *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH***

**JURNAL ILMIAH**

**THEO REY HANDOKO  
123.16.011**



**PROGRAM STUDI TEKNIK METALURGI  
FAKULTAS TEKNIK DAN DESAIN  
INSTITUT TEKNOLOGI SAINS BANDUNG  
KOTA DELTAMAS  
AGUSTUS 2020**

**PENGARUH MOLARITAS NaOH PADA SIFAT  
MEKANIK DAN KARAKTERISASI GEOPOLIMER  
BERBASIS *FLY ASH* DAN *BOTTOM ASH***

**JURNAL ILMIAH**

**THEO REY HANDOKO  
123.16.011**

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik  
Pada Program Studi Teknik Metalurgi

Menyetujui

Kota Deltamas, 15 Agustus 2020

**Dosen Pembimbing**



**Andrie Harmaji, S.T., M.T**

**NIK. 199110107201607516**

# PENGARUH MOLARITAS NaOH PADA SIFAT MEKANIK DAN KARAKTERISASI GEOPOLIMER BERBASIS FLY ASH DAN BOTTOM ASH

Theo Rey Handoko<sup>[1]</sup>, Andrie Harmaji<sup>[1]</sup>

Program Studi Teknik Metalurgi, Institut Teknologi dan Sains Bandung<sup>[1]</sup>

Email: [theo.acmilan@gmail.com](mailto:theo.acmilan@gmail.com)<sup>[1]</sup>

## Abstrak

Indonesia masuk dalam jajaran empat besar negara produsen batu bara dengan produksi batu bara sebesar 539 juta short tons. Fly ash dan bottom ash adalah produk sampingan yang diperoleh dari proses pembakaran batu bara. Penggunaan fly ash dan bottom ash harus dilakukan untuk mengurangi dampak lingkungan yang akan terjadi akibat menumpuknya limbah tersebut. Geopolimer merupakan bahan alternatif pengganti semen yang dibuat menggunakan prekursor yang bisa berasal dari limbah batu bara. Sampel geopolimer dibuat dengan campuran prekursor dan larutan aktivator, perbandingan antara prekursor dengan larutan aktivator yaitu 0,4. Prekursor yang digunakan yaitu campuran fly ash dan bottom ash, larutan aktivator yang digunakan adalah campuran larutan NaOH dengan larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dengan perbandingan NaOH dengan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  yaitu 1:1, dengan variasi konsentrasi larutan NaOH (4M, 6M, 8M, 10M, 12M) dengan masing-masing waktu curing 7, 14, 28 hari. Geopolimer dicetak pada cetakan 5x5x5 cm, Hasil pengujian kuat tekan menunjukkan dengan menggunakan larutan NaOH 10M menghasilkan kuat tekan paling besar yaitu pada sampel GPL10M28H dengan kuat tekan 10,10 MPa, kuat tekan yang dihasilkan dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH serta perlakuan saat curing. Untuk pengujian setting time, waktu tercepat yaitu 630 menit dan yang terlama 1035 menit, yang mempengaruhi setting time adalah reaktivitas bahan dan kandungan karbon sisa pembakaran. densitas geopolimer yang dihasilkan berkisaran antara 1,016 gr/cm<sup>3</sup> – 1,433 gr/cm<sup>3</sup>, massa jenis dipengaruhi oleh porositas yang dihasilkan dan raw material dari prekursor yang digunakan.

**Kata Kunci:** Geopolimer, Molaritas NaOH, Abu terbang, Abu dasar, Kuat tekan, Waktu ikat, Densitas.

## I. PENDAHULUAN :

Batu bara masih menjadi energi primer pembangkit listrik nasional yang murah dan efisien. Indonesia masuk dalam jajaran empat besar negara produsen batu bara di dunia, dengan produksi dengan 539 juta short tons<sup>[1]</sup>. Fly ash adalah produk sampingan yang diperoleh dari proses pembakaran batu bara. Produksi fly ash dari PLTU semakin meningkat, jika tidak diimbangi oleh pemanfaatan maksimum maka keberadaannya juga akan merusak lingkungan<sup>[2]</sup>. Beton adalah bahan konstruksi yang paling serbaguna, tahan lama dan juga bahan yang paling banyak digunakan dalam industri konstruksi. Karena itu, jumlah besar semen portland diperlukan dan sangat terkenal bahwa industri semen dianggap sebagai penghasil gas karbon dioksida yang tinggi. Masalah lingkungan yang terkait dengan produksi semen portland biasanya sangat terkenal serta

dipantau secara ketat dalam hal jumlah karbon dioksida yang dilepaskan ke atmosfer selama produksinya<sup>[3]</sup>. Oleh karena itu, saat ini adalah waktu yang tepat untuk mempromosikan beton alternatif dengan kandungan hidrasi non-semen 100%, yaitu beton geopolimer. Salah satu keuntungan dari beton geopolimer adalah bahwa ia memiliki resistensi yang sangat baik baik dalam lingkungan asam dan garam<sup>[4]</sup>. Konsep geopolimer diperkenalkan oleh Joseph Davidovits pada 1976 untuk Binder pelapis alkali. Bahan ini memiliki komposisi kimia yang mirip dengan zeolit yang terdiri dari kerangka polimer Si-O-Al, sifat yang berbeda serta strukturnya yang amorf. Untuk mensistesis material geopolimer dengan sifat tertentu, ada berbagai macam bahan baku kaya aluminosilikat yang dapat digunakan sebagai prekursor, seperti: Metakaolin, red mud, fly ash, dll. Sifat geopolimer dipengaruhi oleh sumber Al-Si,

aktivator, agregat, air, dan jumlah masing-masing komponen pada campuran, waktu pengerasan / curing, suhu, dimensi partikel, dan perlakuan panas<sup>[5]</sup>. Dalam campurannya, sumber silika dan alumina direaksikan dengan larutan alkali sebagai aktivatornya. Untuk itu, diperlukan komposisi aktivator yang tepat sehingga bisa membentuk pasta geopolimer untuk mengikat agregat menjadi beton geopolimer. Aktivator yang umumnya digunakan adalah campuran  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$  dengan konsentrasi 8M sampai 14M. Perbandingan antara  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan  $\text{NaOH}$  bisa diambil antara 0.4 sampai 2.5<sup>[6]</sup>.

## II. METODOLOGI PENELITIAN

### 2.1. Alat dan Bahan

#### 2.1.1. Alat

Pada percobaan ini, alat yang digunakan adalah gelas kimia ukuran 250 ml, timbangan digital, batang pengaduk, mangkuk, gelas plastik ukuran 150 ml cetakan ukuran 5x5x5 cm, *vicat apparatus*.

#### 2.1.2. Bahan

Bahan-bahan yang diperlukan dalam penelitian ini adalah prekursor berupa campuran *fly ash* dan *bottom ash*,  $\text{NaOH flakes}$ , larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , air PDAM.

### 2.2. Prosedur Kerja

#### 2.2.1. Prosedur Pembuatan Larutan NaOH

Prosedur pembuatan larutan  $\text{NaOH}$  ini dilakukan di rumah. Adapun tahapan dari pembuatan larutan  $\text{NaOH}$  ini yaitu sebagai berikut. Pertama, bahan-bahan dan alat dipersiapkan seperti gelas kimia, batang pengaduk, timbangan digital,  $\text{NaOH flakes}$ , dan air. Selanjutnya,  $\text{NaOH flakes}$  ditimbang sesuai dengan kebutuhan, untuk 4 M menggunakan 32 gram  $\text{NaOH flakes}$ , selanjutnya dilarutkan dalam gelas kimia dengan memasukkan air sebanyak 150 gram, lalu di aduk hingga homogen, setelah larutan mencapai temperatur kamar, larutan diencerkan dengan memasukkan air hingga ambang batas 200 ml pada gelas kimia, setelah homogen, larutan dimasukkan kedalam botol ukuran 250 ml, dilakukan hal yang sama untuk konsentrasi 6, 8, 10, dan 12 M.

#### 2.2.2. Prosedur Pembuatan Larutan Aktivator

Prosedur pembuatan larutan aktivator dilakukan di rumah, dengan tahapan sebagai berikut. Disediakan larutan  $\text{NaOH}$  yang telah dibuat, lalu larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , serta gelas plastik dan pengaduk. Pertama larutan  $\text{NaOH}$  dan larutan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ditimbang dengan perbandingan 1:1, dengan berat 36 gram tiap larutannya, selanjutnya larutan tersebut dimasukkan kedalam gelas plastik, selanjutnya diaduk hingga homogen, setelah dirasa homogen, gelas plastik ditutup dengan tisu dan diikat, selanjutnya dидiamkan hingga 6 jam.

#### 2.2.3. Prosedur Pembuatan Benda Uji

Prosedur pembuatan benda uji dilakukan di rumah untuk pembuatan geopolimer ini dibuat menggunakan variasi molaritas mulai dari 4M hingga 12M, pada percobaan ini digunakan prekursor berupa campuran *fly ash* dan *bottom ash*, dengan masing-masing curing time 7, 14, dan 28 hari, dengan perbandingan aktivator dan prekursor sebesar 0,4, dengan tahapan sebagai berikut. Pertama mempersiapkan dan menimbang bahan sesuai dengan *mix design*, selanjutnya prekursor dan aktivator dicampurkan di dalam wadah mangkok, selanjutnya diaduk hingga homogen, pasta geopolimer yang telah homogen selanjutnya dimasukkan kedalam cetakan, setelah dibiarkan sehari geopolimer selanjutnya dilepaskan dari cetakan.

Tabel 2.1. *Mix Design*

| Kode Sampel | Molaritas NaOH(M) | FABA (gr) | Aktivator (gr) |                                  |
|-------------|-------------------|-----------|----------------|----------------------------------|
|             |                   |           | NaOH           | Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> |
| GPL4M7H     | 4                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL6M7H     | 6                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL8M7H     | 8                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL10M7H    | 10                | 180       | 36             | 36                               |
| GPL12M7H    | 12                | 180       | 36             | 36                               |
| GPL4M14H    | 4                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL6M14H    | 6                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL8M14H    | 8                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL10M14H   | 10                | 180       | 36             | 36                               |
| GPL12M14H   | 12                | 180       | 36             | 36                               |
| GPL4M28H    | 4                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL6M28H    | 6                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL8M28H    | 8                 | 180       | 36             | 36                               |
| GPL10M28H   | 10                | 180       | 36             | 36                               |
| GPL12M28H   | 12                | 180       | 36             | 36                               |

### 2.3. Pengujian Sampel

#### 2.3.1. Pengujian *Setting Time*

Pengujian setting time ini bertujuan untuk mengetahui waktu yang diperlukan material prekursor yang telah tercampur dengan aktivator untuk mengeras yang dihitung mulai dari kontak awal prekursor dengan aktivator menjadi pasta geopolimer. Untuk alat yang digunakan pada pengujian ini adalah *vicat apparatus*, waktu ikatnya terbagi atas 2 yakni waktu ikat awal dan waktu ikat akhir, dan dari pengujian ini didapatkan hasil berupa material tersebut bersifat *retarder* atau akselerator.

#### 2.3.2. Pengujian Kuat Tekan

Kekuatan tekan beton dalam hal ini beton geopolimer merupakan kemampuan suatu beton dalam menerima kekuatan atau gaya tekan persatuan luas. Beton yang memiliki kekuatan tekan yang tinggi dapat diidentifikasi sebagai beton yang memiliki kualitas struktur yang baik dan menggambarkan sejauh mana beton tersebut dapat diandalkan dalam jangka waktu yang panjang. Dalam pengujian ini dilakukan dengan menggunakan metode tes. ASTM C109 "*Compressive Strength of hydraulic cement Mortars (using 2-in or [50-mm] cube Specimen)*".

#### 2.3.3. Pengujian *X-Ray Fluorescence (XRF)*

XRF adalah suatu metode untuk dapat menganalisa komposisi unsur dalam suatu sampel. Prinsip yang digunakan penentuan komposisi unsur berdasarkan interaksi sinar x dengan materi, terdapat dua metode yang digunakan pada XRF, yaitu *disperse energy (EDXRF)* dan dispersi panjang gelombang (*WDXRF*).

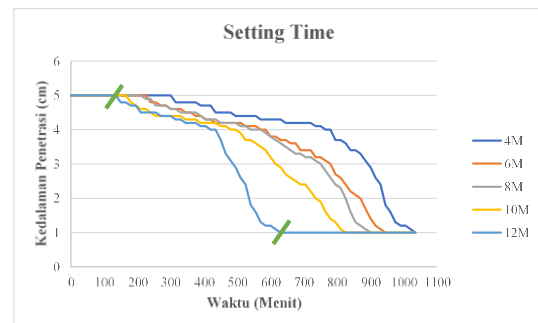
#### 2.3.4. Pengujian *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

Pengujian SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilakukan untuk mengetahui morfologi dan topologi dari geopolimer yang dibuat. Analisis dari SEM dapat digunakan untuk data kristalografi sehingga dapat dikembangkan untuk menentukan senyawa atau elemen yang terbentuk.

## III. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1. Pengaruh Molaritas NaOH Terhadap Waktu Ikat Geopolimer

Data yang diperoleh yang tertera pada gambar 3.1 menunjukkan bahwa geopolimer berbahan dasar campuran *fly ash* dan *bottom ash* yang berasal dari PLTU sijantang merupakan material *retarder* karena waktu ikat awal dan waktu ikat akhirnya yang lama yaitu pada molaritas 4M waktu ikat awal terjadi pada 315 menit dan waktu ikat akhir terjadi pada 1035 menit, waktu ikat tercepat terjadi pada molaritas 12M yaitu waktu ikat awal terjadi pada 150 menit dan waktu ikat akhirnya terjadi pada 630 menit. Terlihat adanya pengaruh molaritas NaOH, dimana makin meningkatnya molaritas NaOH yang digunakan waktu ikat pada geopolimer makin cepat, hal ini terjadi karena makin banyaknya -OH yang bereaksi dengan prekursor sehingga proses geopolimerisasi menjadi cepat.



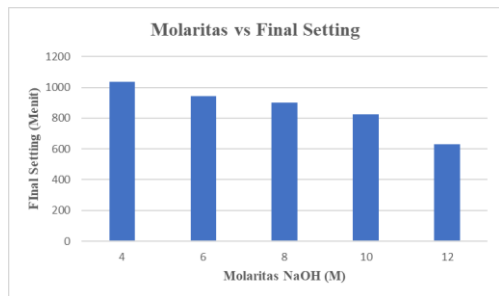
Gambar 3.1. Grafik hasil pengujian *setting time*

Terlihat bahwa ada kesamaan antara semua grafik yaitu terjadi kelandaian yang cukup lama pada awal waktu ikat hingga kedalaman 4 cm, hal ini terjadi karena terhambatnya proses polikondensasi dan reorganisasi, dikarenakan jumlah karbon yang tidak terbakar pada proses pembakaran batu bara melebihi 10%. Karena atom C yang berada pada prekursor bereaksi dengan NaOH dan membentuk gas CO sehingga atom O sebagai penyusun utama berkurang karena berikatan dengan karbon sisa pembakaran yang cukup tinggi tersebut. Kelandaian tersebut juga disebabkan karena material prekursor yang kurang reaktif sehingga lambatnya proses geopolimerisasi.



Gambar 3.2. Gambar terbentuknya  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  pada saat curing

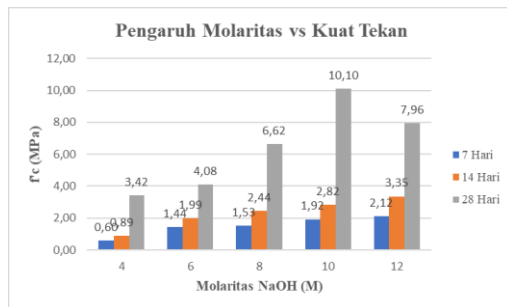
Pengaruh dari molaritas  $\text{NaOH}$  juga dapat dilihat pada final setting dari berbagai sampel yang dirangkum pada gambar 4.3. hal ini membuktikan jika makin tinggi pH larutan basa yang digunakan sebagai aktivator makin cepat reaksi geopolimerisasi yang terjadi. Ini terjadi karena pada saat pelarutan material aluminosilikat, banyaknya gugus  $-\text{OH}$  hidroksil yang terbentuk sehingga lebih reaktif untuk pembentukan *backbone* geopolimer yaitu NASH gel.



Gambar 3.3. Skema grafik final setting

### 3.2. Pengaruh Molaritas $\text{NaOH}$ Terhadap Hasil Kuat Tekan Geopolimer

Penambahan konsentrasi  $\text{NaOH}$  pada campuran geopolimer adalah salah satu aspek yang berpengaruh terhadap kuat tekan geopolimer, yang hasilnya akan dianalisa dari perbandingan benda uji.



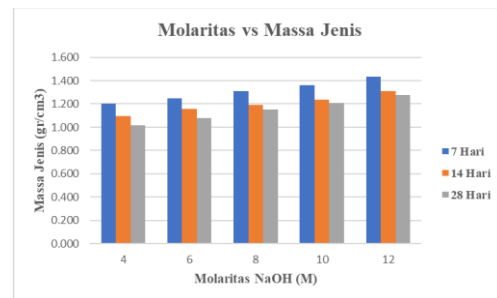
Gambar 3.4. Skema grafik kuat tekan geopolimer

Berdasarkan hasil grafik pada gambar 3.4 diperoleh data berupa nilai pengujian kuat tekan geopolimer yang

mengalami kenaikan seiring bertambahnya molaritas, hal ini terjadi karena pada saat konsentrasi bertambah maka proses geopolimerisasi berlangsung makin cepat dan pembentukan 3-D serta memiliki kuat tekan paling tinggi pada konsentrasi molaritas 10 M pada umur geopolimer 28 hari yaitu 10,10 MPa. Berdasarkan waktu curing kekuatan geopolimer makin besar, hal tersebut dikarenakan pertumbuhan kekuatan pada geopolimer terbilang baik, pada saat curing geopolimer menyerap panas dari lingkungan sehingga dengan kenaikan temperatur pada saat curing sangat berpengaruh pada kuat tekan akhir geopolimer,

### 3.3. Pengaruh Molaritas $\text{NaOH}$ Terhadap Densitas Geopolimer

Beton geopolimer dapat dikategorikan berdasarkan densitas atau massa jenis untuk mengetahui pemakaian yang tepat untuk penggunaannya. Dari data gambar 3.5 nilai densitas geopolimer yang dihasilkan berkisaran antara  $1,016 \text{ gr/cm}^3 - 1,433 \text{ gr/cm}^3$ , berdasarkan standar SNI 03-3449-2002 (2002) geopolimer yang dihasilkan merupakan beton ringan (*Lightweight Concrete*) menyebabkan densitas yang didapatkan lebih rendah dari  $1,9 \text{ gr/cm}^3$ .



Gambar 3.5 Skema grafik pengaruh molaritas  $\text{NaOH}$  terhadap densitas geopolimer

Hal ini terjadi dikarenakan banyaknya rongga-rongga udara didalam sampel sehingga sampel menjadi ringan, rongga-rongga udara ini terbentuk dikarenakan adanya reaksi pembentukan gas  $\text{CO}_2$  pada proses sehingga geopolimer menjadi lebih ringan, Namun yang paling mendominasi membuat sampel geopolimer ringan adalah kandungan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  yang sangat tinggi pada prekursor sehingga densitas yang didapatkan menjadi kecil. Sampel geopolimer yang dihasilkan juga tergolong sebagai beton

dengan kekuatan menengah, kategori tersebut berdasarkan densitas dan kuat tekan dari geopolimer yang dihasilkan. Dari hasil pengamatan grafik tersebut dapat dilihat bahwa molaritas NaOH berpengaruh dengan nilai densitas geopolimer yang didapatkan makin tinggi molaritas yang digunakan sebagai aktivator maka makin tinggi nilai densitas yang didapatkan ini dikarenakan adanya kehilangan air pada saat *curing*, makin rendah molaritas yang digunakan maka kandungan air yang ada pada larutan juga makin besar sehingga ketika proses *curing* terjadi maka kehilangan air juga akan semakin besar, hal ini sejalan dengan waktu *curing* dikarenakan makin lama waktu *curing* maka densitasnya makin rendah.

### 3.4. Analisis Hasil Pengujian XRF

Dari tabel 3.1 didapatkan hasil bahwa sumber batu bara yang digunakan dalam pembakaran PLTU Sijantang merupakan batu bara berjenis bituminus dan tergolong *fly ash* tipe F. Dari tabel 3.2 didapatkan hasil senyawa  $Al_2O_3$  yang sangat tinggi yakni 55,01 wt%, hal ini terjadi dikarenakan pengolahan pembersihan batu bara yang kurang baik sehingga masih banyak kandungan tanah yang ikut tercampur bersama batu bara.

Tabel 3.1. Hasil XRF *fly ash* PLTU Sijantang

| Senyawa   | Berat(%) |
|-----------|----------|
| $Al_2O_3$ | 32,26    |
| $SiO_2$   | 52,85    |
| CaO       | 0,62     |
| $TiO_2$   | 0,66     |
| $Fe_2O_3$ | 13,60    |

Tabel 3.2. Hasil XRF campuran *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Sijantang

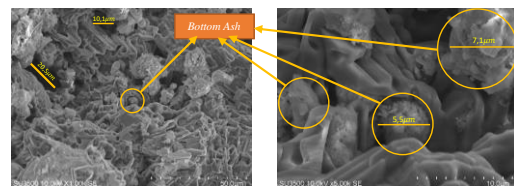
| Senyawa   | Berat(%) |
|-----------|----------|
| $Al_2O_3$ | 55,01    |
| $SiO_2$   | 34,23    |
| CaO       | 1,30     |
| $TiO_2$   | 0,89     |
| $Fe_2O_3$ | 8,57     |

Dari *raw material* yang didapatkan, hal tersebut sangat berpengaruh pada *setting time* atau waktu ikat pada geopolimer dikarenakan perbandingan bahan prekursor

sebagai bahan penyusun utama geopolimer sudah tidak reaktif dan perbandingan antara  $SiO_2$  dan  $Al_2O_3$  yang berpengaruh terhadap pembentukan *backbone* pada rantai geopolimer nantinya, serta berpengaruh pada kuat tekan geopolimer, hal ini karena  $SiO_2$  yang seharusnya sebagai penyusun kekuatan utama jumlahnya lebih sedikit dibandingkan  $Al_2O_3$ .

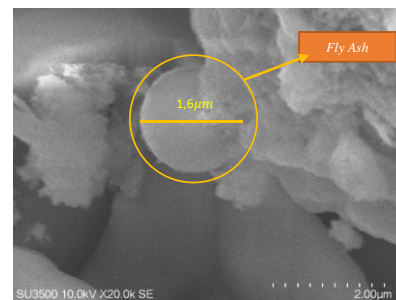
### 3.5. Analisis Hasil Pengujian SEM

Dari hasil pengujian SEM yang telah dilaksanakan, dapat dilakukan pengamatan pada hasil SEM tersebut.



Gambar 3.6. Hasil uji SEM 1000x dan 5000x

Dapat dilihat bahwa masih banyak *bottom ash* yang masih belum bereaksi atau lebih tepatnya larut dan membentuk struktur jaringan geopolimer, hal ini dikarenakan bahan prekursor kurang reaktif untuk bereaksi menjadi struktur geopolimer.



Gambar 3.7. Hasil uji SEM 20000x

Terlihat juga *fly ash* yang juga belum bereaksi. Dan juga terlihat banyaknya rongga akibat adanya gas yang terjebak yaitu CO sehingga adanya pori dengan ukuran hingga  $20,5\mu m$  sehingga kekuatannya tidak maksimal, serta menjadi lebih ringan. Dilihat dari gambar, yang banyak bereaksi adalah *fly ash* dikarenakan sedikit *fly ash* yang belum bereaksi, hal ini terjadi karena kandungan  $SiO_2$  untuk membentuk geopolimer cukup tinggi. terlihat juga bahwa ukuran *fly ash* yang sangat halus yaitu  $1,6\mu m$ , sehingga harus dimanfaatkan dengan tepat.

#### IV. KESIMPULAN

1. Geopolimer yang terbuat dari campuran *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU Sijantang dengan menggunakan larutan NaOH berkonsentrasi 10M dapat melewati standar kuat tekan beton K-100 dengan kuat tekannya 10,10 MPa.
2. Waktu *setting time* terlama terjadi pada benda uji dengan molaritas NaOH 4M yaitu 1035 menit dan yang tercepat pada benda uji dengan molaritas 12M yaitu 630 menit.
3. Yang mempengaruhi lamanya *setting time* pada geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Sijantang adalah tingginya karbon sisa hasil pembakaran dan kurang reaktifnya prekursor yang digunakan.
4. Beberapa hal yang dipengaruhi oleh molaritas NaOH yang digunakan adalah lama proses *setting time* yaitu makin tinggi molaritas NaOH maka makin cepat proses *setting time*, kuat tekan dipengaruhi juga oleh molaritas NaOH, makin tinggi molaritas NaOH yang digunakan maka makin tinggi kuat tekan yang dihasilkan, serta memiliki titik balik pada molaritas NaOH 10M, semakin tinggi konsentrasi NaOH yang digunakan, semakin tinggi densitas geopolimer yang dihasilkan.
5. Geopolimer yang dihasilkan adalah beton ringan berkekuatan menengah, dikarenakan adanya sejumlah gas CO yang terjebak didalam geopolimer, dengan densitas terendah adalah geopolimer dengan molaritas 4M dan curing time 28 hari yaitu 1,016g/cm<sup>3</sup>.
6. Kuat tekan geopolimer dipengaruhi oleh, molaritas NaOH yang digunakan, semakin tinggi molaritas yang digunakan maka makin tinggi kuat tekan yang dihasilkan, dipengaruhi juga oleh porositas yang terjadi akibat pembentukan gas CO, akibat banyaknya karbon sisa pembakaran pada material prekursor, kuat tekan dipengaruhi juga oleh banyaknya material prekursor yang membentuk struktur geopolimer.

#### V. DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. N. Azzura, "Indonesia Diharapkan Bisa Pakai Limbah Batubara untuk Konstruksi," 3 Desember 2019. [Online]. Available: <https://www.merdeka.com/uang/indonesia-diharapkan-bisa-pakai-limbah-batubara-untuk-konstruksi.html>.
- [2] A. Widayanti, R. A. A. Soemitro, H. Suprayitno and J. J. Ekaputri, "Characterization and compressive strength of fly ash based-geopolymer paste," *MATEC Web of Conferences* 195, 01023, 2018.
- [3] A. V. Lăzărescu, H. Szilagyi, C. Baeră and A. Ioani, "The Effect of Alkaline Activator Ratio on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Paste," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 209 (2017) 012064, 2017.
- [4] S. Subekti, R. Bayuaji, M. S. Darmawan, N. A. Husin, B. Wibowo, B. Anugraha, S. Irawan and D. Dibiantara, "Review: Potential Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Paste with Substitution of Local Waste Materials with High-Temperature Effect," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 267 (2017) 012001, 2017.
- [5] D. D. B. Nergis, M. M. A. B. Abdullah, P. Vizureanu and M. F. M. Tahir, "Geopolymers and Their Uses: Review," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 374 (2018) 012019, 2018.
- [6] R. Bayuaji, D. M. Sigit, B. Wibowo, H. N. Ahmad, S. Subekti, J. Ekaputri and editors, "The Influence of Chloride Environment on Compressive Strength of Geopolymer Concrete with Fly Ash Using Taguchi Approach. Applied Mechanics and Materials," *Trans Tech Publ.*, 2015.



- [7] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw and B. V. Rangan, "On the development of fly ash-based geopolymer concrete," *ACI Material Journal* 101, pp. 467-472, 2004.
- [8] SNI 03-3449-2002, TATA CARA RENCANA PEMBUATAN CAMPURAN BETON RINGAN DENGAN AGREGAT RINGAN, 2002.
- [9] ASTM C191-13, Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, West Conshohocken: ASTM International, 2013.
- [10] ASTM C109/ C109M, Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or 50-mm Cube Specimens), West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [11] ASTM C618-03, Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete., West Conshohocken: ASTM International, 2003.