

PENGEMBANGAN MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR CIRCULATING FLUIDIZED BED COMBUSTION FLY ASH

Stacia Dwi Shenjaya¹, Maria Lupita², Djwantoro Hardjito³, David Wiyono⁴, Antoni⁵

ABSTRAK : Berdasarkan sistem pembakarannya, terdapat 2 jenis *fly ash*, yaitu *Pulverized Coal Combustion* (PCC) dan *Fluidized Bed Combustion* (FBC). Berdasarkan tingkat fluidisasinya, terdapat 2 jenis FBC *fly ash* yaitu *bubbling bed unit* dan *circulating unit* (CFBC). PCC *fly ash* lebih sering digunakan sebagai bahan dasar geopolimer dibandingkan CFBC *fly ash* karena bentuknya yang tidak beraturan dan luas permukaannya lebih besar sehingga membutuhkan lebih banyak air. Penelitian ini berfokus untuk membandingkan variasi konsentrasi larutan NaOH dan variasi perbandingan *alkali activator* terhadap *setting time* dan kuat tekan mortar geopolimer, serta menganalisa tampilan fisik mortar geopolimer berbahan dasar CFBC *fly ash* tipe F. Konsentrasi larutan NaOH yang digunakan sebesar 6M, 8M, 10M, dan 12M, sedangkan perbandingan *alkali activator* yang digunakan sebesar 3.0, 2.5, 2.0, 1.0, dan 0.5. CFBC *fly ash* tipe F yang digunakan diambil 2 kali dengan waktu yang berbeda pada sumber yang sama. Berdasarkan hasil penelitian disimpulkan bahwa CFBC *fly ash* memiliki potensi sebagai bahan dasar dalam pembuatan mortar geopolimer. Hal ini didukung dengan hasil kuat tekan mortar geopolimer tertinggi yang dihasilkan, yaitu sebesar 33.4 MPa pada usia 90 hari meskipun tidak konsisten jika menggunakan *fly ash* yang berbeda waktu pengambilannya. Selain itu, konsentrasi larutan NaOH sebesar 12M dan perbandingan *alkali activator* sebesar 0.5 merupakan komposisi yang tidak tepat.

KATA KUNCI: CFBC *fly ash* tipe F, konsentrasi larutan NaOH, perbandingan *alkali activator*, dan kuat tekan

1. PENDAHULUAN

Berdasarkan sistem pembakarannya, terdapat 2 jenis *fly ash*, yaitu *Pulverized Coal Combustion* (PCC) dan *Fluidized Bed Combustion* (FBC). Berdasarkan tingkat fluidisasinya, sistem pembakaran FBC dibagi menjadi dua jenis, yaitu *bubbling bed unit* dan *circulating unit* (CFBC) (Robl, Mahboub, Will, & Robert, 2010). Selama ini *fly ash* yang umum digunakan untuk geopolimer adalah PCC *fly ash* karena bentuknya yang bulat dan memiliki reaktivitas tinggi (Chindaprasirt, Rattanasak, & Jaturapitakkul, 2011). Sedangkan penggunaan CFBC *fly ash* sangat jarang digunakan untuk geopolimer karena memiliki bentuk yang tidak beraturan dan luas permukaan yang lebih besar daripada PCC *fly ash* sehingga CFBC *fly ash* membutuhkan lebih banyak air (Robl, Mahboub, Will, & Robert, 2010). Waktu pengambilan CFBC *fly ash* mempengaruhi konsistensi *fly ash*. Pada penelitian yang dilakukan Vellyana & Christanto (2018), CFBC *fly ash* yang diambil sebanyak 2 kali dengan waktu yang berbeda menghasilkan kuat tekan mortar yang berbeda pula. Hal ini dikarenakan kandungan batu bara yang digunakan dalam proses pembakaran batu bara tidak konsisten sehingga menyebabkan *fly ash* yang

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21415018@john.petra.ac.id

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21415064@john.petra.ac.id

³Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, djwantoro.h@petra.ac.id

⁴Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, david.wiyono.1991@gmail.com

⁵Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, antoni@petra.ac.id

dihasilkan memiliki kandungan kimia yang berbeda pula sehingga mempengaruhi kereaktifan *fly ash* tersebut. Selain itu, CFBC *fly ash* juga dapat menjadi potensi sebagai bahan dasar geopolimer. Pada penelitian yang dilakukan oleh Natanegara & Sutrisno (2018), penggunaan CFBC *fly ash* dapat menghasilkan kuat tekan mortar geopolimer yang cukup tinggi, yaitu sebesar 37.8 MPa pada usia 28 hari dengan perbandingan larutan sodium silikat dan padatan NaOH 8M sebesar 2.5, tetapi terjadi *efflorescence* pada penelitian tersebut. Maka, penelitian ini berfokus untuk membandingkan variasi konsentrasi larutan NaOH dan variasi perbandingan *alkali activator* terhadap *setting time* dan kuat tekan mortar geopolimer, serta menganalisa tampilan fisik mortar geopolimer berbahan dasar CFBC *fly ash* tipe F.

2. STUDI PUSTAKA

2.1. Beton Geopolimer

Geopolimer merupakan alkali aluminosilikat sintetik yang dihasilkan oleh reaksi antara aluminosilikat padat dengan alkali hidroksida atau silikat dengan konsentrasi tinggi (Duxson, et al., 2007). *Fly ash* pada beton geopolimer berfungsi sebagai *binder* (bahan pengikat) (Hardjito & Rangan, 2005). *Alkali activator* yang digunakan berupa sodium hidroksida (NaOH) karena lebih banyak tersedia dan murah (Hardjito, Cheak, & Ing, 2008). Berbagai variasi komposisi *alkali activator* yang digunakan akan sangat mempengaruhi berbagai karakteristik dasar beton dalam hal *setting time*, *compressive strength*, dan lainnya (Antoni, Satria, Sugiarto, & Hardjito, 2017).

2.2. Pengaruh Konsistensi *Fly Ash*

Waktu pengambilan *fly ash* dapat mempengaruhi konsistensi *fly ash*. Hal ini terbukti pada penelitian yang dilakukan oleh Antoni, Widiyanto, Wiranegara, & Hardjito (2017) menggunakan PCC *fly ash* tipe C yang diambil 10 kali dan penelitian yang dilakukan oleh Vellyana & Christanto (2018) menggunakan CFBC *fly ash* tipe F yang diambil 2 kali untuk menghasilkan mortar. Kedua penelitian tersebut menghasilkan nilai kuat tekan yang berbeda dari campuran *fly ash* yang berbeda tersebut. Hal ini dikarenakan kandungan batu bara yang digunakan dalam proses pembakaran batu bara tidak konsisten sehingga menyebabkan *fly ash* yang dihasilkan memiliki kandungan kimia, khususnya kandungan silika, alumina, kapur, dan sulfat yang berbeda pula sehingga mempengaruhi kereaktifan *fly ash* tersebut (Salain, 2010).

2.3. *Efflorescence*

Efflorescence merupakan suatu kumpulan garam berwarna putih yang terbentuk pada permukaan beton (ACI 116R-90, 1990). *Efflorescence* ini dapat terjadi pada beton geopolimer karena adanya kandungan larutan alkali aktif dan kondisi yang lembab (Zhang, Yang, & Wang, 2014). *Efflorescence* mengakibatkan penurunan kuat tekan (Natanegara & Sutrisno, 2018).

2.4. *Curing*

Berdasarkan penelitian Hardjito, Wallah, Sumajouw, & Rangan (2005), kuat tekan beton geopolimer dapat meningkat ketika dilakukan dengan *curing oven*. Dengan suhu yang semakin tinggi maka kuat tekan akan naik lebih tinggi, namun *curing oven* dengan suhu di atas 60°C selama 24 jam tidak memberikan kenaikan kuat tekan yang signifikan.

3. METODE PENELITIAN

3.1. Material

Material yang digunakan pada penelitian ini antara lain agregat halus berupa pasir silika, air mineral, CFBC *fly ash* tipe F yang berasal dari PLTU Ngoro, larutan sodium silikat, dan larutan NaOH. *Fly ash* yang digunakan terdiri dari 2 macam yang dibedakan berdasarkan waktu pengambilannya, yaitu *fly ash*

Ngoro A yang diambil pada 7 Desember 2018 dan *fly ash* Ngoro B yang diambil pada 23 Februari 2019. Larutan sodium silikat yang digunakan memiliki kadar air sebesar 46.06%.

3.2. Mix Design

Mix design mengacu pada penelitian Natanegara dan Sutrisno (2018), dimana konsentrasi larutan NaOH yang digunakan sebesar 6M, 8M, 10M, dan 12M. Selain itu, perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH yang digunakan sebesar 3.0, 2.5, 2.0, 1.0, dan 0.5. *Water/fly ash ratio* yang digunakan pada penelitian ini berdasarkan hasil pengujian konsistensi normal yaitu sebesar 0.55 untuk *fly ash* Ngoro A dan 0.375 untuk *fly ash* Ngoro B. Mortar di-*curing* di dalam oven dengan suhu 60°C selama 24 jam dengan *cooling down* 3 jam. *Mix composition* yang digunakan dapat dilihat pada **Tabel 1**.

3.3. Proses Pembuatan Pasta dan Mortar Geopolimer

Pembuatan pasta geopolimer diawali dengan membuat larutan NaOH dahulu yang kemudian didiamkan selama 24 jam, lalu dicampurkan dengan larutan sodium silikat sehingga menjadi larutan *alkali activator*. Setelah itu, *alkali activator* tersebut dicampur dengan *fly ash* dan diaduk hingga merata. Kemudian, adonan pasta geopolimer dituang ke dalam cincin konik untuk diuji *setting time*-nya pada suhu ruang. Pembuatan pasta geopolimer ini menggunakan *fly ash* Ngoro B dengan *mix composition* yang ditunjukkan pada **Tabel 1**. Awal dari prosedur pembuatan mortar geopolimer sama seperti prosedur pembuatan pasta geopolimer. Perbedaannya adalah setelah *alkali activator* dicampur dengan *fly ash* dan diaduk merata, kemudian adonan tersebut dicampurkan dengan pasir dan diaduk hingga merata (Natanegara & Sutrisno, 2018). Pembuatan mortar geopolimer ini menggunakan *fly ash* Ngoro A dan Ngoro B dengan *mix composition* yang ditunjukkan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Mix Composition

<i>Fly Ash</i> Ngoro A	$w/fa = 0.55$		Mortar	<i>fly ash</i> : pasir	
<i>Fly Ash</i> Ngoro B	$w/fa = 0.375$			1 : 2	
Sodium Silikat (liq)	3.0	2.5*	2.0	1.0*	0.5
NaOH (liq)					
Konsentrasi Larutan NaOH	6M	6M	6M	6M	6M
	8M	8M	8M	8M	8M
	10M	10M	10M	10M	10M
	-	12M	-	12M	-
Keterangan	*menggunakan <i>fly ash</i> Ngoro A Pasta hanya menggunakan <i>fly ash</i> Ngoro B saja				

3.4. Pengujian Sampel

Pada sampel pasta geopolimer hanya dilakukan pengujian *setting time* pada suhu ruang yang berdasarkan berdasarkan ASTM C 191-04 (2004) dengan menggunakan alat *vicat needle*. Sedangkan, pada sampel mortar geopolimer dilakukan pengujian *workability*, kuat tekan, dan pengamatan tampilan fisik permukaan mortar. Pengujian *workability* dilakukan dengan menggunakan *flow table test* berdasarkan ASTM C 1437-07 (2007). Pengujian kuat tekan dilakukan setelah mortar berusia 7, 28, dan 90 hari dengan alat tes tekan di Laboratorium Beton Universitas Kristen Petra berdasarkan ASTM C 109M-07 (2007). Pengamatan tampilan fisik pada mortar geopolimer dilakukan dengan merendam bagian bawah mortar geopolimer ke dalam wadah yang berisi air setinggi 1 cm dan menyimpan mortar pada suhu ruang. Pengamatan ini bertujuan untuk melihat apakah mortar mengalami *efflorescence* selama 7 dan 28 hari.

4. HASIL DAN ANALISA

4.1. Analisa Material

Analisa material pada penelitian ini dilakukan pada *fly ash* dan pasir. *Fly ash* yang digunakan terdiri dari 2 macam yang dibedakan berdasarkan waktu pengambilannya, yaitu *fly ash* Ngoro A yang diambil pada

7 Desember 2018 dan *fly ash* Ngoro B yang diambil pada 23 Februari 2019. *Fly ash* yang digunakan berwarna coklat dan berasal dari PLTU Ngoro dengan sistem pembakaran CFBC. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Natanegara dan Sutrisno (2018) menggunakan analisa *X-Ray Fluorescence* (XRF), *fly ash* yang berasal dari PLTU Ngoro ini bertipe F karena kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ lebih dari 50% dan mencapai 90%, dan kadar CaO lebih rendah dari 10% yaitu 2,20%. *Fly Ash* Ngoro A memiliki nilai pH sebesar 5.9, sedangkan *fly ash* Ngoro B memiliki nilai pH sebesar 9.3. Hasil dari analisa *specific gravity* (GS) dan konsistensi normal dapat dilihat pada **Tabel 2**. Pengujian *Particle Size Analysis* (PSA) dilakukan untuk menentukan ukuran dari material *fly ash* yang digunakan. Hasil analisa PSA untuk *fly ash* Ngoro A dan Ngoro B dapat dilihat pada **Tabel 2**.

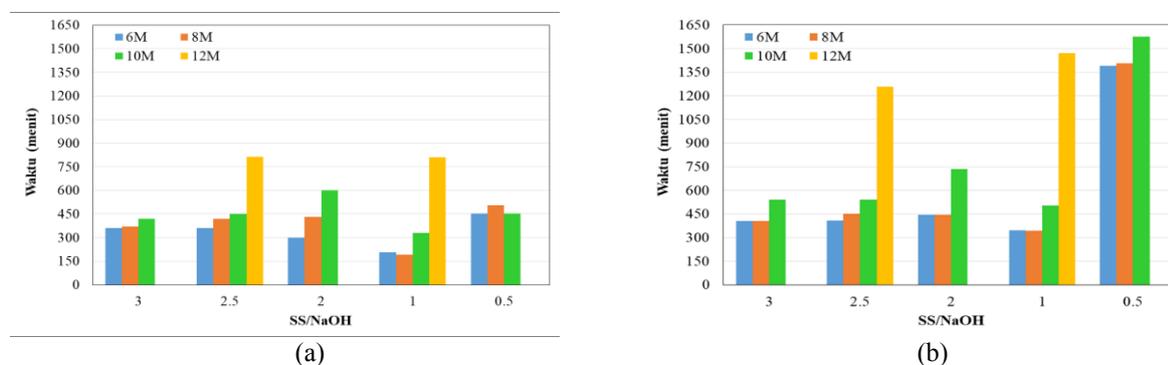
Pasir yang digunakan adalah pasir silika mesh 20/40 berasal dari Tuban. *Specific gravity* dari pasir silika yaitu 2.53. Modulus kehalusan yang didapat adalah sebesar 2.452. *Alkali activator* yang digunakan adalah larutan NaOH dan larutan sodium silikat dengan 46.06% H_2O , 16.10% Na_2O , dan 37.84% SiO_2 .

Tabel 2. Hasil Analisa GS, Konsistensi Normal, dan PSA

<i>Fly Ash</i>	GS	w/fa	SSA (cm^2/g)
Ngoro A	2.375	0.55	7637.97
Ngoro B	2.211	0.375	19477.23

4.2. Hasil dan Analisa Pengujian *Setting Time* Pasta Geopolimer

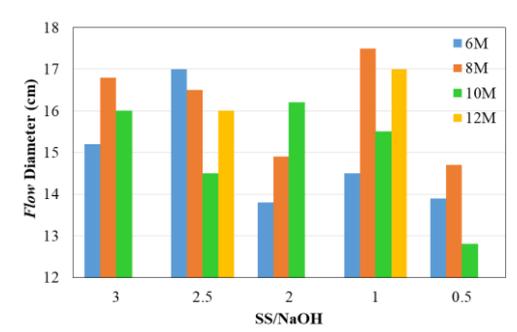
Hasil analisa yang dapat dilihat pada **Gambar 1** menunjukkan bahwa *initial setting time* dan *final setting time* tercepat dicapai pada campuran pasta geopolimer dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 1.0 pada konsentrasi larutan NaOH sebesar 8M. Pada campuran pasta geopolimer dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 2.5 pada konsentrasi larutan NaOH sebesar 12M memiliki waktu terlama untuk mencapai *initial setting time*. Sedangkan, durasi terlama untuk mencapai *final setting time* terjadi pada campuran pasta geopolimer dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 0.5 pada konsentrasi larutan NaOH sebesar 10M. Pada **Gambar 1** dapat dilihat juga bahwa pada campuran pasta geopolimer dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 1 pada konsentrasi NaOH sebesar 6M, 8M, dan 10M selalu memiliki waktu tercepat untuk mencapai *initial setting time* dan *final setting time*. Hasil analisa ini berbeda dengan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan oleh Risdanareni, Jaya, & Abdullah (2015), dimana pada penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH pada campuran pasta geopolimer, maka waktu untuk mencapai *setting time* juga semakin cepat. Besar kemungkinan perbedaan ini terjadi akibat penggunaan *fly ash* yang berbeda dalam sistem pembakarannya, dimana pada penelitian ini digunakan CFBC *fly ash* tipe F, sedangkan pada penelitian sebelumnya digunakan PCC *fly ash* tipe F.



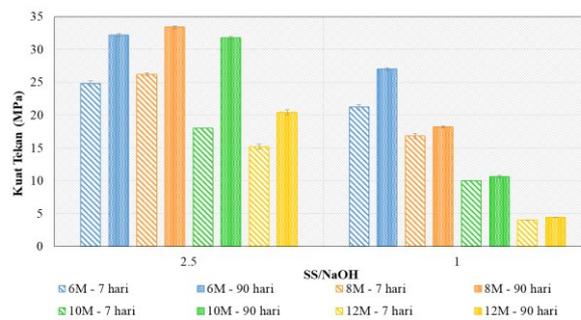
Gambar 1. Analisa *Setting Time*, (a) *Initial Setting Time*; (b) *Final Setting Time*

4.3. Hasil dan Analisa Pengujian *Workability* Mortar Geopolimer

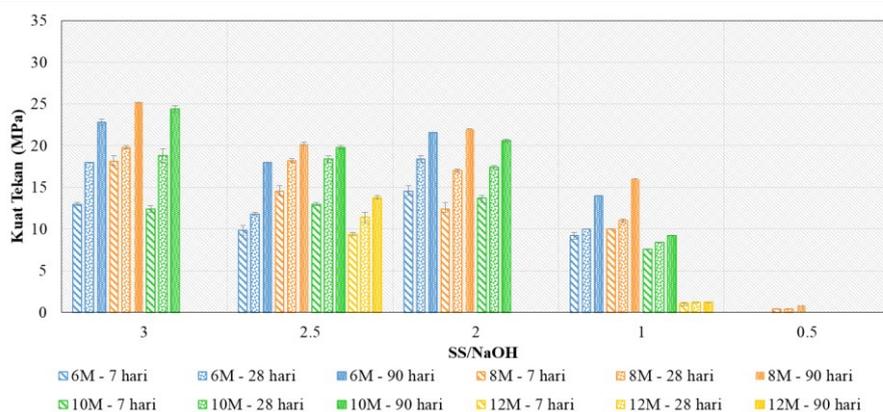
Pada **Gambar 2** dapat dilihat bahwa *flow diameter* terbesar dicapai pada campuran mortar geopolimer dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 1 pada konsentrasi larutan NaOH sebesar 8M dan *flow diameter* terkecil terjadi pada campuran mortar geopolimer dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 0.5 dan konsentrasi larutan NaOH sebesar 10M. Hal ini menunjukkan bahwa perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 0.5 merupakan komposisi yang kurang tepat karena dapat mengurangi kelecakan mortar tersebut.



Gambar 2. Analisa *Workability*



(a)



(b)

Gambar 3. Analisa Kuat Tekan Mortar, (a) *Fly Ash* Ngoro A; (b) *Fly Ash* Ngoro B

4.4. Hasil dan Analisa Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer

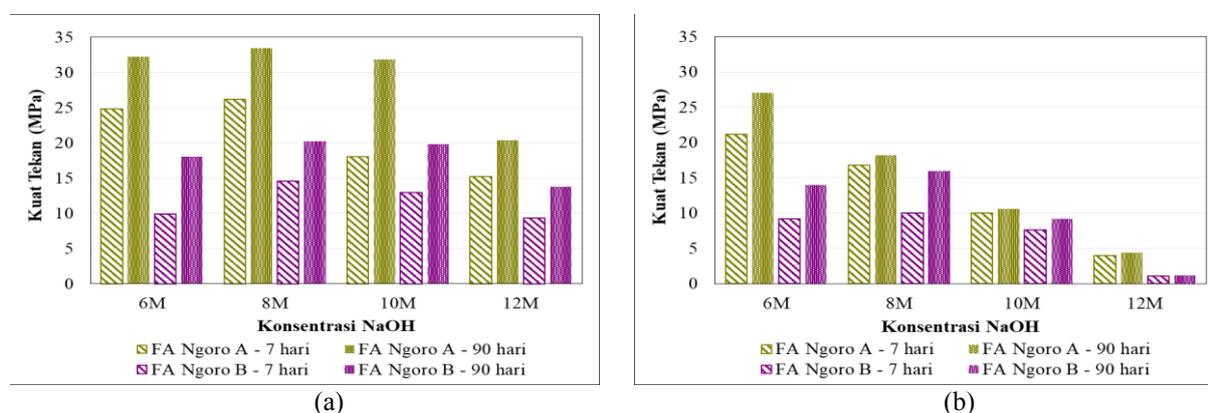
4.4.1. Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan Menggunakan *Fly Ash* Ngoro A dan Ngoro B

Pada campuran mortar geopolimer ini digunakan *fly ash* Ngoro A dengan *w/fa* sebesar 0.55 dan *fly ash* Ngoro B dengan *w/fa* sebesar 0.375 sesuai dengan hasil pengujian konsistensi normal yang telah dilakukan. Pada **Gambar 3** dapat dilihat hasil analisa kuat tekan mortar geopolimer dengan menggunakan *fly ash* Ngoro A dan Ngoro B. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa semakin besar

perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH, maka kuat tekan akan semakin meningkat. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Lăzărescu, Szilagyi, Baeră, dan Ioani (2017), dimana pada penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kadar larutan sodium silikat yang digunakan pada campuran pasta, maka semakin tinggi juga nilai kuat tekan yang dihasilkan. Hal ini dapat terjadi karena adanya tambahan kandungan Si akan mempengaruhi proses geopolimerisasi.

4.4.2. Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan Menggunakan *Fly Ash* Ngoro A dan Ngoro B

Pada **Gambar 4** dapat dilihat grafik analisa perbandingan kuat tekan mortar geopolimer yang menggunakan *fly ash* Ngoro A dan Ngoro B dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH, yaitu 2.5 dan 1.0 pada konsentrasi larutan NaOH sebesar 6M, 8M, 10M, dan 12M pada usia 7 dan 90 hari.

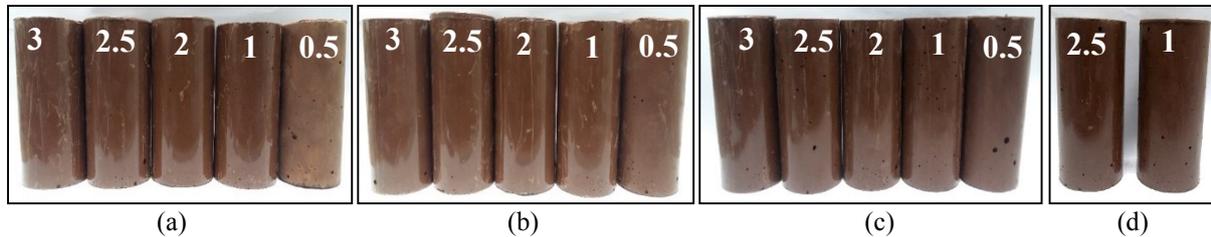


Gambar 4. Analisa Perbandingan Kuat Tekan Mortar dengan Menggunakan *Fly Ash* Ngoro A dan Ngoro B , (a) Perbandingan Larutan Sodium Silikat dan Larutan NaOH = 2.5; (b) Perbandingan Larutan Sodium Silikat dan Larutan NaOH = 1.0

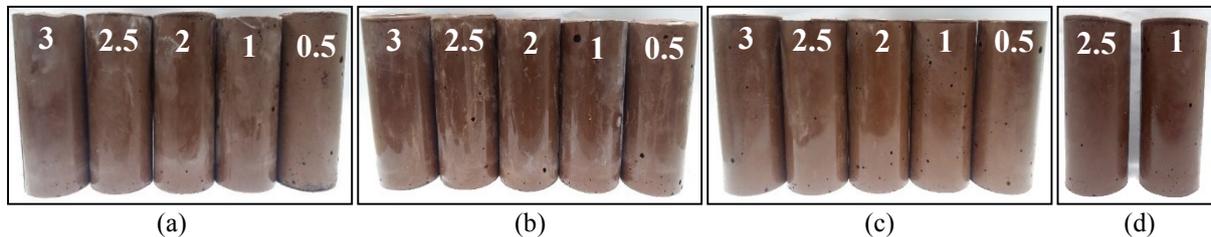
Dari **Gambar 4** dapat dilihat bahwa mortar yang menggunakan *fly ash* Ngoro A selalu memiliki kuat tekan yang lebih tinggi daripada mortar yang menggunakan *fly ash* Ngoro B. Namun terjadinya perbedaan kuat tekan ini tidak sesuai dengan hasil pegujian konsistensi normal dari kedua *fly ash* tersebut, dimana *fly ash* Ngoro B memiliki hasil konsistensi normal sebesar 0.375, tetapi nilai kuat tekan mortar yang dihasilkan jauh lebih rendah daripada mortar dengan *fly ash* Ngoro A yang memiliki hasil konsistensi normal sebesar 0.55. Selain itu, pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa *fly ash* Ngoro B memiliki tingkat kehalusan yang lebih tinggi daripada *fly ash* Ngoro A. Pada umumnya, *fly ash* dengan tingkat kehalusan tinggi membutuhkan air yang lebih banyak sehingga memiliki hasil konsistensi normal yang lebih tinggi juga. Namun, seperti yang dapat dilihat pada **Tabel 2** *fly ash* Ngoro A yang memiliki hasil konsistensi normal sebesar 0.55, tetapi tingkat kehalusannya lebih rendah daripada *fly ash* Ngoro B. Selain itu, *fly ash* Ngoro A dan Ngoro B memiliki perbedaan hasil analisa pH yang sangat signifikan. Pada umumnya, *fly ash* merupakan material yang bersifat basa, tetapi pada penelitian ini *fly ash* Ngoro A memiliki sifat asam karena nilai pH yang dihasilkan lebih kecil dari 7 (pH netral). Perbedaan yang signifikan antara kedua *fly ash* Ngoro yang hanya dibedakan dari waktu pengambilannya ini kemungkinan diakibatkan adanya perbedaan bahan dasar batu bara yang digunakan tidak konsisten sehingga mempengaruhi kereaktifan dari *fly ash* tersebut. Penelitian seperti ini sebelumnya pernah dilakukan oleh Antoni, Widiyanto, Wiranegara, & Hardjito (2017), dimana dengan penggunaan 10 macam *fly ash* yang dibedakan dari waktu pengambilannya menghasilkan kuat tekan yang berbeda pula. Perbedaan ini diakibatkan karena penggunaan batu bara yang tidak konsisten dalam proses pembakarannya sehingga dihasilkan *fly ash* yang berbeda juga.

4.5. Tampilan Fisik Mortar Geopolimer

Tampilan fisik mortar geopolimer pada usia 7 hingga 28 hari dapat dilihat pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa tampilan fisik mortar geopolimer tersebut tidak mengalami *efflorescence* pada semua macam campuran mortar meskipun direndam air. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan Natanegara dan Sutrisno (2018), dimana pada penelitian itu dilakukan *curing oven* sehingga *efflorescence* tidak terjadi.



Gambar 5. Tampilan Fisik Mortar Geopolimer pada Suhu Ruang dengan Konsentrasi Larutan NaOH, (a) 6M; (b) 8M; (c) 10M; (d) 12M



Gambar 6. Tampilan Fisik Mortar Geopolimer dengan di Rendam Air 1 cm dengan Konsentrasi Larutan NaOH, (a) 6M; (b) 8M; (c) 10M; (d) 12M

5. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa hasil dan pembahasan maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. CFBC *fly ash* tipe F yang berasal dari PLTU Ngoro yang diambil 2 kali dengan waktu berbeda memiliki perbedaan hasil analisa pH, konsistensi normal, dan PSA yang signifikan meskipun diambil dari sumber PLTU yang sama dan hanya dibedakan dari waktu pengambilannya. *Fly Ash* Ngoro A memiliki pH asam, tingkat kehalusan rendah, dan hasil konsistensi normal yang tinggi, namun nilai kuat tekan mortar geopolimer yang dihasilkan lebih tinggi daripada mortar yang menggunakan *fly ash* Ngoro B pada setiap variasi perbandingan *alkali activator* dan konsentrasi larutan NaOH.
2. CFBC *fly ash* memiliki potensi sebagai bahan dasar dalam pembuatan mortar geopolimer. Hal ini dapat dibuktikan dari pasta geopolimer dapat mencapai *final setting time* pada suhu ruang dengan waktu tercepat yaitu 342 menit dan terlama yaitu 1575 menit. Selain itu, hasil kuat tekan mortar geopolimer tertinggi yang dihasilkan, yaitu sebesar 33.4 MPa pada usia 90 hari meskipun tidak konsisten jika menggunakan *fly ash* yang berbeda waktu pengambilannya. Tampilan fisik mortar geopolimer juga tidak mengalami *efflorescence*.
3. Pasta geopolimer berbahan dasar CFBC *fly ash* tipe F dengan perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 1 membutuhkan waktu paling singkat untuk mencapai *setting time*. Selain itu, mortar geopolimer dengan konsentrasi larutan NaOH sebesar 8M memiliki nilai kuat tekan tertinggi.
4. Perbandingan larutan sodium silikat dan larutan NaOH sebesar 0.5 merupakan komposisi yang tidak tepat. Selain itu, penggunaan konsentrasi larutan NaOH sebesar 12M juga tidak tepat. Hal ini dikarenakan pasta geopolimer membutuhkan waktu paling lama untuk mencapai *setting time* dan kuat tekan mortar geopolimer yang dihasilkan sangat rendah jika menggunakan kedua komposisi tersebut.

6. DAFTAR REFERENSI

- ACI 116R-90. (1990). *Cement and Concrete Terminology*. Naples, Florida, United States of America: America Concrete Institute.
- Antoni, Satria, J., Sugiarto, A., & Hardjito, D. (2017). Effect of Variability of Fly Ash Obtained from the Same Source on the Characteristics of Geopolymer. *MATEC Web of Conferences*, 97. EDP Sciences. doi:10.1051/mateconf/20179701026
- Antoni, Widiyanto, A. K., Wiranegara, J. L., & Hardjito, D. (2017). Consistency of Fly Ash Quality for Making High Volume Fly Ash Concrete. *Jurnal Teknologi*, 13-20. doi:10.11113/jt.v79.11870
- ASTM C 109M-07. (2007). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: ASTM International.
- ASTM C 191-04. (2004). *Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: ASTM International.
- ASTM C 1437-07. (2007). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken, Pennsylvania, United States of America: ASTM International.
- Chindaprasirt, P., Rattanasak, U., & Jaturapitakkul, C. (2011). Utilization of Fly Ash Blends from Pulverized Coal and Fluidized Bed Combustions in Geopolymeric Materials. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), 55–60. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.017>
- Duxson, P., Ferná'ndez-Jime'nez, A., Provis, J., Lukey, G., Palomo, A., & van Deventer, J. (2007, May). Geopolymer Technology: The Current State of The Art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917-2933. doi:10.1007/s10853-006-0637-z
- 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., Cheak, C. C., & Ing, C. H. L. (2008, July). Strength and Setting Times of Low Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. *Modern Applied Science*, 2(4). doi:10.5539/mas.v2n4p3
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2005). On The Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI Materials Journal*, 101(6), 467–472.
- Lăzărescu, A. V., Szilagyi, H., Baeră, C., & Ioani, A. (2017). The Effect of Alkaline Activator Ratio on the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Paste. *International Conference on Innovative Research*. IOP Publishing. doi:10.1088/1757-899X/209/1/012064
- Natanegara, A. & Sutrisno, B. (2018). *Identifikasi Potensi Fly Ash PLTU Ngoro dengan Sistem Pembakaran Circulated Fluidized Bed sebagai Bahan Dasar Geopolimer*. Skripsi. Program S1 Teknik Sipil Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- Risdanareni, P., Jaya, E. J., & Abdullah, M. M. (2015). Effect of Alkaline Activator Ratio to Mechanical Properties of Geopolymer Concrete with Trass as Filler. *Applied Mechanics and Materials*, 754-755, 406-412. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.754-755.406
- Robl, T., Mahboub, K., Will, S., & Robert, R. (2010). Fluidized Bed Combustion Ash Utilization: CFBC Fly Ash as a Pozzolanic Additive to Portland Cement Concrete. In P. Claisse, E. Ganjian, F. Canpolat, & T. Naik (Eds.), *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Università Politecnica delle Marche, June 28-June 30, 2010*. Ancona, Italy: International Committee of the SCMT Conferences: Peter Claisse, Esmail Ganjian, and Tarun Naik. Retrieved from <http://www.claisse.info/Proceedings.htm>
- Salain, I. M. (2010, March). Study on Reactivity of Circulating Fluidized Bed Combustion Fly Ashes in the Presence of Water. *Civil Engineering Dimension*, 12(1), 29-35.
- Vellyana & Christanto, D. (2018). *Penggunaan Fly Ash dari PLTU Ngoro sebagai Pengganti Sebagian Semen dalam Pembuatan Mortar*. Skripsi. Program S1 Teknik Sipil Universitas Kristen Petra. Surabaya.
- Zhang, Z. H., Yang, T., & Wang, H. (2014). The Effect of Efflorescence on The Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Binders. *23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, I*, 107–112.