

IDENTIFIKASI POTENSI *FLY ASH* PLTU NGORO DENGAN SISTEM PEMBAKARAN *CIRCULATED FLUIDIZED BED* SEBAGAI BAHAN DASAR GEOPOLIMER

Albert Natanegara¹, Benedictus Trista Dmitri Sutrisno², Djwantoro Hardjito³, Antoni⁴

ABSTRAK: Geopolimer dibuat dengan mencampurkan dua bahan dasar yakni *fly ash* dan *alkali activator*. Penelitian-penelitian terdahulu menggunakan *fly ash* tipe C sebagai bahan dasarnya dan pada penelitian kali ini menggunakan *fly ash* dari PLTU Ngoro yang memiliki tipe F. PLTU ini memiliki sistem pembakaran *Circulating Fluidized Bed* (CFB), di mana karakteristik *fly ash* yang dihasilkan berbeda dengan *fly ash* PLTU pada umumnya, yang memakai sistem *Pulverized Coal Combustion* (PCC). Perbedaan karakteristik diakibatkan perbedaan kualitas batu bara dan suhu pembakaran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa potensi *fly ash* Ngoro dan pengaruh sodium silikat terhadap kuat tekan, *workability*, dan *setting time* geopolimer. Kadar molaritas NaOH yang digunakan adalah 8M sampai 14M. Campuran dibagi menjadi tiga tahap yaitu tahap pertama dengan perbandingan massa sodium silikat:NaOH(solid) 2,5; Tahap kedua dan ketiga ditentukan berdasarkan hasil tahap pertama. Tahap pertama menunjukkan kuat tekan sebesar 37,8 MPa. Namun semakin tinggi sodium silikat yang dipakai, semakin turun kekuatannya. Tahap kedua digunakan perbandingan massa Si:Al = 3 namun justru menunjukkan hasil kuat tekan turun drastis hingga 8,4 MPa. Tahap ketiga dilakukan penambahan jumlah silikat. Pada tahap ketiga menunjukkan hasil kuat tekan tertinggi adalah 34,8 MPa pada umur 7 hari.

KATA KUNCI: *fly-ash* tipe F, *fly ash* CFB, molaritas NaOH, *alkali activator*, kuat tekan, *setting time*, *workability*.

1. PENDAHULUAN

Beton geopolimer dalam pembuatannya tidak menggunakan *Portland Cement* namun menggunakan material sisa limbah industri yakni *fly-ash* sehingga dalam pembuatannya dapat mengurangi penggunaan semen dan mengurangi biaya pembuangan limbah industri (Saha, 2018). Beton geopolimer menggunakan larutan NaOH dan sodium silikan sebagai *alkali activator* (Hardjito & Rangan, 2005). Penelitian kali ini menggunakan bahan dasar *fly-ash* dari PLTU Ngoro, Mojokerto dimana PLTU Ngoro memiliki sistem pembakaran *Fluidized Bed Combustion* (FBC) dengan tipe *Circulated Fluidized Bed* (CFB). Percobaan terdahulu menunjukkan pemakaian *fly ash* produk FBC menyebabkan kuat tekan mortar geopolimer rendah, jika dibandingkan dengan mortar geopolimer *fly ash* produk *Pulverized Coal Combustion* (PCC) . Selain itu, *fly ash* PLTU Ngoro selama ini diolah sebagai *raw material grade* , di mana *fly ash* tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya untuk menjadi pengganti semen, sedangkan *fly ash* PCC telah dimanfaatkan sebagai pengganti semen. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi *fly ash* PLTU Ngoro dan serta pengaruh perbandingan massa sodium silikat:NaOH(solid) = 2,5 dan sodium silikat tetap terhadap kuat tekan, *workability*, dan *setting time*.

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, albert.nta@gmail.com

²Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, benedictus.sutrisno@gmail.com

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

⁴Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, antoni@petra.ac.id

2. STUDI LITERATUR

2.1 Beton Geopolimer

Semen Portland merupakan material utama yang digunakan dalam pembuatan beton konvensional namun semen memiliki dampak negatif terhadap lingkungan dalam pembuatannya karena memproduksi CO₂ (Triwulan et al., 2007). Dengan tidak digunakannya semen dalam beton geopolimer maka emisi CO₂ dalam industri semen pun dapat dikurangi (Hardjito et al., 2004). Beton geopolimer tersusun atas dua komponen yakni material dasar dan larutan *alkali activator*. Material dasar dapat berupa *fly ash*, *silica fume*, *slag*, *rice-husk ash*, *red mud*, dll. Sedangkan larutan *alkali activator* dapat berupa sodium hidroksida (NaOH) atau potassium hidroksida (KOH) dan sodium silikat atau potassium silikat (Lloyd & Rangan, 2010).

2.2 Fly Ash

Fly ash merupakan partikel halus dari proses pembakaran batu bara. Hasil pembakaran batu bara ini banyak digunakan sebagai bahan tambahan beton untuk memperbaiki kualitas (Putra et al., 2014). ASTM C 618 mengkategorikan *fly ash* berdasarkan kandungan besi, aluminium, dan silika, yang dikelompokkan menjadi kelas N, F, dan C (Tikalsky et al., 1993). Selain itu, *fly ash* juga dapat dikategorikan berdasarkan sistem pembakarannya, yaitu *Fluidized Bed Combustion* (FBC) dan *Pulverized Coal Combustion* (PCC). Perbedaan kedua jenis *fly ash* ini terletak pada kandungan kimia dan bentuk partikelnya. Percobaan dengan memakai kedua jenis *fly ash* telah dilakukan, dan menunjukkan kuat tekan umur 7 hari yang rendah pada mortar geopolimer *fly ash* FBC, dan kuat tekan yang tinggi pada mortar geopolimer *fly ash* PCC. Hal ini disebabkan oleh fase amorf *fly ash* FBC yang rendah, sehingga *fly ash* hanya bereaksi sebagian (Chindaprasirt et al., 2011).

2.3 Alkali Activator

Larutan alkali yang digunakan adalah larutan NaOH 8 M, 10 M, dan 14 M serta larutan sodium silikat (Na₂SiO₃). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa semakin besar perbandingan dari campuran antara NaOH dengan sodium silikat, maka semakin cepat *setting time* yang terjadi (Wijaya et al., 2016). Hasil studi menunjukkan bahwa perbandingan antara Na₂SiO₃/NaOH yang paling efektif yang menghasilkan kuat tekan paling tinggi adalah 2,5 (Abdullah et al., 2011).

2.4 Efflorescence

Efflorescence adalah pembentukan suatu kumpulan garam berwarna putih yang terjadi pada permukaan beton. Pada beton geopolimer, *efflorescence* dapat menjadi masalah yang signifikan ketika sampel terkena udara lembab atau kontak dengan air (Zhang et al., 2014). Sampel mortar yang terkena kontak dengan air memiliki kuat tekan yang lebih rendah dibandingkan dengan sampel yang didiamkan pada suhu ruangan. Hal ini disebabkan oleh *sodium leaching*, sebuah mekanisme difusi kation alkali menjadi *leachant* (Škvára et al., 2012).

2.5 Metode Pembuatan Geopolimer

Pada umumnya Geopolimer dibuat dengan cara: Pertama, mencampurkan larutan NaOH dan larutan sodium silikat (Na₂SiO₃) sebagai *alkali activator*, Kedua mencampurkan semua material kering seperti *fly ash* dan agregat selama kurang lebih 3 menit dengan *mixer* dan terakhir menambahkan *alkali activator* ke dalam material kering dan melanjutkan pencampuran selama 4 menit (Hardjito, 2005).

3. METODE PENELITIAN

3.1 Material

Dalam penelitian ini *fly ash* yang digunakan berasal dari PLTU Ngoro, Mojokerto dimana *fly ash* tersebut memiliki tipe F dengan sistem pembakaran *Circulated Fluidized Bed* (CFB). *Fly ash* CFB memiliki perbedaan bentuk partikel dan kandungan kimia yang berbeda dengan *fly ash Pulverized Coal Combustion* (PCC). Pasir yang digunakan untuk mortar adalah Pasir Lumajang. Pasir yang digunakan

dikeringkan terlebih dahulu kemudian digradasi sesuai standar (ASTM C778-13, 2014). Setelah itu, dipastikan agar pasir dalam kondisi SSD (*Saturated Surface Dry*). Kemudian untuk *alkali activator* digunakan larutan NaOH dan sodium silikat. Sodium silikat yang dipakai ada dua jenis, seperti dapat dilihat pada **Tabel 1**. Perbandingan massa antara sodium silikat dan sodium hidroksida padat adalah 2,5 dengan kadar molaritas NaOH 8 M sampai 14 M (Antoni, et al., 2017).

Tabel 1. Kandungan Kimia Sodium Silikat

	Sodium Silikat I	Sodium Silikat II
Na ₂ O+SiO ₂ (%)	58	39
Air (%)	42	61

3.2 Mix Design

Tabel 2. Mix Design 1

Kode Campuran	Fly Ash (gr)	Pasir (gr)	Larutan NaOH			Sodium Silikat	
			Konsentrasi	NaOH (<i>solid</i>) (gr)	Air (gr)	Na ₂ O+SiO ₂ (58%) (gr)	Air (42%) (gr)
A1	300	600	8M	48	133,5	69,6	50,4
A2			10M	60	124,5	87	63
A3			14M	84	115,5	121,8	88,2
B1	300	600	8M	57,6	160,2	83,52	60,48
B2			10M	72	149,4	104,4	75,6
B3			14M	100,8	138,6	146,16	105,84
C1	300	600	8M	67,2	186,9	97,44	70,56
C2			10M	84,0	174,3	121,8	88,2
C3			14M	117,6	161,7	170,52	123,48

Tabel 3. Mix Design 2

Kode Campuran	Fly Ash (gr)	Pasir (gr)	Larutan NaOH			Sodium Silikat	
			Konsentrasi	NaOH (<i>solid</i>) (gr)	Air (gr)	Na ₂ O+SiO ₂ (39%) (gr)	Air (61%) (gr)
D1	300	600	6M	36	139,5	44,32	69,32
D2			7M	42	136,5	44,32	69,32
E1	300	600	6M	43,2	167,4	44,32	69,32
E2			7M	50,4	163,8	44,32	69,32
E3			8M	57,6	160,2	44,32	69,32
F	300	600	8M	48	133,5	65,03	101,71

Penelitian ini menggunakan 2 *mix design*. *Mix Design 1* mengacu pada penelitian sebelumnya (Antoni et al., 2017) dimana *alkali activator* yang digunakan adalah larutan NaOH dengan kadar 8 M, 10 M, dan 14 M serta sodium silikat I dengan kandungan kimia seperti pada **Tabel 1**, dengan perbandingan massa 2,5 kali dari massa NaOH padat. *Mix design 2* mengacu pada perbandingan massa Si:Al dimana pada *mix design 1* ditemukan perbandingan massa Si:Al = 3 merupakan yang terbaik untuk menghasilkan kuat tekan tinggi. *Mix design 2* memakai sodium silikat II dengan kandungan kimia seperti pada **Tabel 1**. *Mix design 1* dan 2 dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**. Perbandingan massa *fly ash*:pasir yang digunakan adalah 1:2 (Erlando et al., 2017). Pada penelitian ini kami menggunakan *curing* suhu ruangan.

4. HASIL DAN ANALISA

4.1 Analisa Material

Analisa material yang kami lakukan adalah analisa *X-Ray Fluorescence* (XRF) pada *fly ash* Ngoro yang dapat dilihat pada **Tabel 4**. *Fly ash* PLTU Ngoro ini memiliki 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%, sehingga *fly ash* ini dapat digolongkan *fly ash* tipe F.

Tabel 4. Kandungan Senyawa Kimia *Fly Ash* Ngoro

Parameter	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	MnO ₂	P ₂ O ₅	L O I
% wt	48,94	35,11	5,99	1,93	2,20	1,34	0,95	0,40	0,15	0,07	0,14	2,50

4.2 Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan Perbandingan Massa Sodium Silikat:NaOH(solid) = 2,5 (*Mix Design 1*)

Hasil uji kuat tekan mortar geopolimer *mix design 1* dapat dilihat pada **Tabel 5**. Pada *mix design 1*, dihasilkan kuat tekan tertinggi pada sampel A1, yaitu mencapai 37,8 MPa pada umur 28 hari. Pada penelitian ini, ditemukan dua faktor yang mempengaruhi kuat tekan mortar geopolimer, yaitu jumlah air dan perbandingan massa Si:Al. Jumlah air yang terlalu banyak akan menyebabkan kuat tekan mortar berkurang. Perhitungan massa Si didasarkan dengan perhitungan massa atom Si yang terdapat pada kandungan kimia *fly ash* pada **Tabel 4**, dan kandungan kimia sodium silikat pada **Tabel 1**. Perbandingan massa Si:Al yang terlalu besar mengindikasikan kadar sodium yang berlebihan yang dapat menyebabkan pembentukan sodium karbonat dan dapat mengganggu proses polimerisasi (Barbosa & Thaumaturgo, 1999). Hal ini sesuai pada penelitian ini, di mana dapat dilihat pada sampel B3 dan C3 memiliki kuat tekan 0 MPa pada umur 7 sampai 28 hari. Hal ini dikarenakan sampel B3 dan C3 memiliki kandungan air yang banyak, yang dapat menurunkan kuat tekan yang dihasilkan, dan perbandingan massa Si:Al yang terlalu besar.

Tabel 5. Kuat Tekan *Mix Design 1* (*Curing Suhu Ruangan*)

Kode Campuran	<i>Fly Ash</i> (gr)	Pasir (gr)	Larutan NaOH			Sodium Silikat		Total Air (gram)	Massa Si:Al	Kuat Tekan 7 hari (MPa)	Kuat Tekan 14 hari (MPa)	Kuat Tekan 28 hari (MPa)
			Konsentrasi	NaOH (<i>solid</i>) (gr)	Air (gr)	Na ₂ O+Si O ₂ (58%) (gr)	Air (42%) (gr)					
A1	300	600	8M	48	133,5	69,6	50,4	183,9	3,03	34,4	36	37,8
A2			10M	60	124,5	87	63	187,5	3,17	33,6	31,2	35,6
A3			14M	84	115,5	121,8	88,2	203,7	3,46	20	12,9	10,3
B1	300	600	8M	57,6	160,2	83,52	60,48	220,7	3,14	29,7	30,4	33,9
B2			10M	72	149,4	104,4	75,6	225,0	3,32	20,1	19,9	16,7
B3			14M	100,8	138,6	146,16	105,84	244,4	3,66	0,0	0,0	0,0
C1	300	600	8M	67,2	186,9	97,44	70,56	257,5	3,26	24,4	25,1	26,4
C2			10M	84,0	174,3	121,8	88,2	262,5	3,46	11,5	8,3	0,0
C3			14M	117,6	161,7	170,52	123,48	285,2	3,86	0,0	0,0	0,0

4.3 Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan Perbandingan Massa Si:Al = 3 (*Mix Design 2*)

Kuat tekan yang dihasilkan pada *mix design 2* tidak sesuai dengan yang diharapkan. Pada *mix design Tahap 2*, kuat tekan tertinggi terdapat pada sampel D2, dengan kuat tekan umur 28 hari sebesar 8,4 MPa. Hal ini kami duga karena pengaruh kandungan air yang banyak dan perbandingan massa Si:Al yang terlalu kecil dikarenakan sodium silikat pada *mix design 2* berbeda dengan *mix design 1* sehingga kami melakukan penyesuaian ulang dan mendapatkan bahwa perbandingan massa Si:Al = 2,82, yang

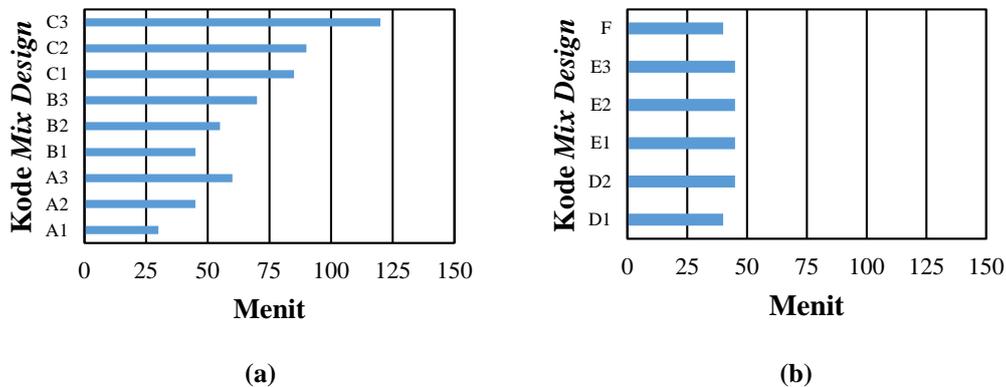
mengindikasikan kadar sodium terlalu sedikit untuk reaksi, sehingga geopolimerisasi tidak dapat berjalan sempurna.

Untuk melakukan verifikasi pengaruh perbandingan massa Si:Al terhadap kuat tekan maka kami membuat sampel F, dengan komposisi seperti pada **Tabel 3**, di mana kami lakukan penyesuaian perhitungan perbandingan massa Si:Al = 3, sesuai dengan kadar sodium silikat II yang dipakai pada tahap ini. Sampel F memiliki kuat tekan umur 28 hari yang tinggi, yaitu sebesar 41,3 MPa, dengan jumlah air yang banyak, tetapi perbandingan massa Si:Al = 3. Dapat disimpulkan bahwa pada kedua faktor yang mempengaruhi kuat tekan mortar, perbandingan massa Si:Al lebih dominan dalam mempengaruhi kuat tekan yang dihasilkan, sementara jumlah air perlu dipertimbangkan agar tidak terlalu banyak sehingga dapat menurunkan kuat tekan, tetapi juga tidak terlalu sedikit sehingga campuran menjadi kering.

Tabel 6. Kuat Tekan Mix Design 2 (Curing Suhu Ruangan)

Kode Campuran	Fly Ash (gr)	Pasir (gr)	Larutan NaOH			Sodium Silikat		Total Air (gram)	Massa Si:Al	Kuat Tekan 7 hari (MPa)	Kuat Tekan 14 hari (MPa)	Kuat Tekan 28 hari (MPa)
			Konse ntrasi	NaOH (solid) (gr)	Air (gr)	Na ₂ O+Si O ₂ (39%) (gr)	Air (61%) (gr)					
D1	300	600	6M	36	139,5	44,32	69,32	208,82	2,82	0,0	2,0	3,6
D2			7M	42	136,5	44,32	69,32	205,82	2,82	6,0	6,8	8,4
E1	300	600	6M	43,2	167,4	44,32	69,32	236,72	2,82	0,0	0,0	2,1
E2			7M	50,4	163,8	44,32	69,32	233,12	2,82	0,0	2,7	3,3
E3			8M	57,6	160,2	44,32	69,32	229,52	2,82	0,0	3,1	4,3

4.4 Hasil Pengujian Setting Time Pasta Geopolimer



Gambar 1. Initial Setting Time Mix Design 1 (a), dan Mix Design 2 (b).

Initial setting time pada pasta geopolimer untuk *mix design* 1 ditunjukkan pada **Gambar 1 (a)**. *Initial setting time* terlama terjadi pada sampel C3, dengan waktu 120 menit, sedangkan yang tercepat terjadi pada sampel A1, dengan waktu 30 menit. *Initial setting time* pada pasta juga dipengaruhi oleh kandungan air pada campuran dan perbandingan massa Si:Al, di mana sampel C3 memiliki kandungan air yang banyak dan perbandingan massa Si:Al yang besar, menyebabkan *initial setting time* sampel C3 menjadi lama sedangkan sampel A1 memiliki kandungan air yang lebih sedikit dan perbandingan massa Si:Al yang lebih kecil pula, menyebabkan *initial setting time* sampel A1 menjadi cepat.

Gambar 1 (b) menunjukkan *initial setting time* pada pasta geopolimer *mix design* 2. Rata-rata *initial setting time* yang terjadi pada *mix design* ini sangatlah cepat, dengan rata-rata waktu 44 menit. Hal ini dikarenakan perbandingan massa Si:Al yang kecil. Perbandingan massa Si:Al mengindikasikan jumlah sodium silikat yang terlalu sedikit. Jumlah sodium silikat yang terlalu sedikit pada larutan

akan membuat proses geopolimerisasi rendah karena jumlahnya yang terlalu sedikit untuk membantu reaksi, dan proses geopolimerisasi akan membutuhkan waktu lebih sedikit untuk menyelesaikan proses peleburannya, menyebabkan *initial setting time* menjadi lebih cepat (Siyal, et al., 2016).

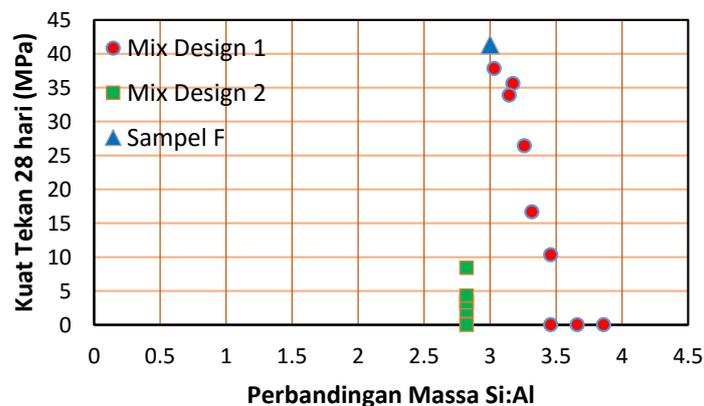
4.5 Hasil Pengujian *Workability* Mortar Geopolimer

Hasil uji *workability* mortar geopolimer pada *mix design* 1 dan 2 dapat dilihat pada **Tabel 7**. Sampel B2, C2, dan C3 memiliki jumlah air yang sangat banyak, menyebabkan cairan menjadi sangat encer, sehingga *flow diameter* tidak dapat diukur. Pada *mix design* 1, jumlah air semakin meningkat seiring dengan naiknya molaritas NaOH, menyebabkan *flow diameter* yang terjadi juga semakin besar. Sedangkan untuk *mix design* 2 dengan kadar sodium silikat tetap, jumlah air semakin rendah seiring dengan meningkatnya molaritas NaOH, menyebabkan *flow diameter* yang terjadi semakin kecil. Pada sampel F, *flow diameter* yang terjadi cukup besar yakni 18 cm, dikarenakan adanya penambahan sodium silikat dan menyebabkan meningkatnya jumlah air.

Tabel 7. *Workability* Mortar Geopolimer

Kode Campuran	Jumlah Air (gram)	<i>Slump Diameter</i> (cm)
A1	183,9	15,5
A2	187,5	19
A3	203,7	20
B1	220,7	16,5
B2	225,0	23
B3	244,4	<i>Overflow</i>
C1	257,5	20,5
C2	262,5	<i>Overflow</i>
C3	285,2	<i>Overflow</i>
D1	208,82	14,5
D2	205,82	13,5
E1	236,72	16
E2	233,12	14
E3	229,52	13
F	235,20	18

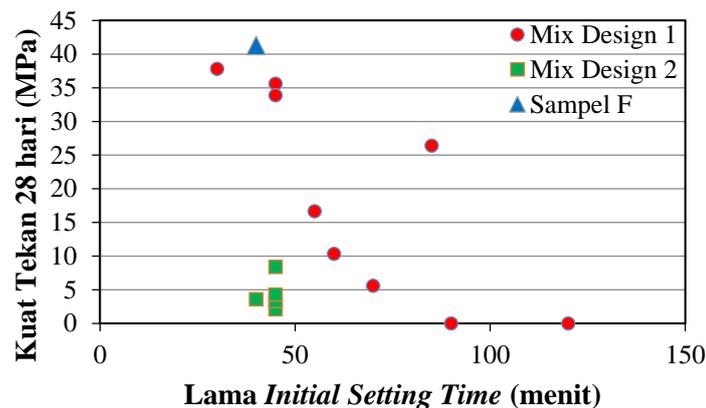
4.6 Hubungan antara Kuat Tekan Mortar Geopolimer dan Perbandingan Massa Si:Al



Gambar 2. Hubungan antara Kuat Tekan Mortar Geopolimer dengan Perbandingan Massa Si:Al

Pada **Gambar 2** dapat dilihat perbandingan antara kuat tekan mortar geopolimer dan perbandingan massa Si:Al. Perbandingan massa Si:Al lebih dari 3 menunjukkan kuat tekan mortar yang menurun. Hal ini disebabkan kadar sodium yang berlebihan dapat menyebabkan pembentukan sodium karbonat dan dapat mengganggu proses polimerisasi (Barbosa & Thaumaturgo, 1999). Kuat tekan turun drastis pada *Mix Design 2* di mana perbandingan massa Si:Al nya kurang dari 3. Penurunan kuat tekan yang drastis ini kami duga akibat terlalu banyak kandungan air pada campuran, dan juga kadar sodium silikat yang terlalu sedikit. Sodium silikat yang terlalu sedikit menyebabkan proses geopolimerisasi tidak berjalan sempurna, sehingga kuat tekan yang dihasilkan rendah.

4.7 Hubungan antara *Initial Setting Time* dengan Kuat Tekan Mortar Geopolimer



Gambar 3. Hubungan antara Kuat Tekan 28 Hari dengan *Initial Setting Time*

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara kuat tekan sampel *Mix Design 1* dan *2* umur 28 hari dengan *initial setting time*. Untuk *Mix Design 1* dan sampel F, dapat dilihat bahwa semakin meningkatnya kuat tekan, maka semakin cepat *initial setting time* yang terjadi. Hal yang aneh terjadi pada *mix design 2*, di mana hubungan kuat tekan dan *initial setting time* tidak membentuk suatu *trend*. Hal ini, seperti yang sudah kami ungkapkan pada Subbab 4.3 tentang *initial setting time*, bahwa perbandingan massa Si:Al dengan jumlah air mempengaruhi *initial setting time* yang terjadi. Pada *Mix Design 2*, perbandingan massa Si:Al yang kecil menandakan bahwa sodium silikat yang dipakai sedikit, sehingga membuat *initial setting time* yang terjadi cepat, tetapi kandungan air yang banyak juga memberikan pengaruh pada *initial setting time*. Sedangkan kuat tekan yang rendah pada *Mix Design 2* disebabkan terlalu sedikitnya sodium silikat pada campuran, sehingga proses geopolimerisasi tidak berjalan sempurna, menyebabkan kuat tekan yang dihasilkan rendah.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan analisa, dapat disimpulkan bahwa :

1. *Fly ash* PLTU Ngoro dengan sistem pembakaran CFB memiliki beberapa potensi, yaitu mampu mengeras pada suhu ruangan, dan dapat menghasilkan kuat tekan tinggi dengan komposisi yang tepat.
2. Sodium silikat memegang faktor yang penting dalam kuat tekan mortar geopolimer. Komposisi yang tidak tepat dapat menghasilkan kuat tekan yang rendah. Perbandingan massa Si:Al = 3,03 menghasilkan kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari.
3. *Mix design* dengan memakai perbandingan massa sodium silikat:NaOH(solid) = 2,5 menunjukkan peningkatan *workability* dan *setting time* seiring dengan naiknya molaritas, karena bertambahnya sodium silikat yang dipakai, sehingga kandungan air pada campuran semakin banyak.

4. *Mix design* dengan sodium silikat tetap menunjukkan penurunan *workability* dan *setting time* seiring dengan naiknya molaritas, karena sodium silikat yang tetap dan bertambahnya jumlah NaOH(solid) yang dipakai, menyebabkan kandungan air pada campuran semakin sedikit.

6. DAFTAR REFERENSI

- Abdullah, MMA., Kamarudin, H., Mohammed, H., Nizar, I. K., Rafiza, A. R., & Zarina, Y. (2011). "The Relationship of NaOH Molarity, Na₂SiO₃/NaOH Ratio, Fly Ash/Alkaline Activator Ratio, and Curing Temperature to the Strength of Fly Ash-Based Geopolymer." *Advanced Materials Research* 328, 1475–1482.
- 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 Conferences*, 97(February), 9–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/mateconf/20179701026>
- ASTM C778-13. (2014). *Standard Specification for Sand*. 65.198.187.10 (Vol. 14).
- Barbosa, V.F.F., MacKenzie K.J.D., & Thaumaturgo, C. (1999). Synthesis and Characterization of Sodium Polysialate Inorganic Polymer Based on Alumina and Silica. *Geopolymer International Conference*, 2, 65–78. [https://doi.org/10.1016/S1466-6049\(00\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S1466-6049(00)00041-6)
- Chindapasirt, 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>
- Djwantoro Hardjito, Steenie E Wallah, Dody M.J. Sumajouw, & B.V Rangan. (2004). Factors Influencing the Compressive Strength of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. *Civil Engineering Dimension*, 6(July 2015), 88–93. <https://doi.org/10.9744/ced.6.2.pp.88-93>
- Erlando, W., Frengki, G., & Hardjito, D. (2017). *Pengaruh Urutan Pencampuran dan Komposisi Alkali Activator terhadap Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Tipe C*. Universitas Kristen Petra
- Hardjito, D. (2005). *Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. Curtin University of Technology.
- Hardjito, D., & Rangan, B.V. (2005). *Development and Properties of Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete*. : Curtin University of Technology.
- Lloyd, N. a, & Rangan, B. V. (2010). Geopolymer Concrete with Fly Ash. *Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, 3(January), 1493–1504.
- Putra, A. K., Wallah, S. E., & Dapas, S. O. (2014). Kuat Tarik Belah Beton Geopolymer Berbasis Abu Terbang (Fly ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2(7), 330–336.
- Rattanasak, U., & Chindapasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073–1078.
- Saha, A. K. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28(1), 25–31. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Siyal, A.A., Azizli, K.A., Man, Z., & Ullah, H. (2016). Effects of Parameters on the Setting Time of Fly Ash Based Geopolymers Using Taguchi Method. *Procedia Engineering*, 148, 302–307.
- Škvára, F. ., Šmilauer, V. ., Hlaváček, P., Kopecký, L., & Cílová, Z. (2012). A weak alkali bond in (N, K)- A-S-H gels: evidence from leaching and modeling. *Ceramics–Silikáty*, 56, 374–382.
- Tikal'sky, Paul J, Carrasquillo, R. L. (1993). Fly Ash Evaluation and Selection for Use in Sulfate Resistant Concrete. *ACI Materials Journal*, 90(6), 545–551.
- Triwulan, Ekaputri, J. J., & Adiningtyas, T. (2007). Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dan Lumpur Porong Kering sebagai Pengisi. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Sipil*, 33(3), 33–45.
- Wijaya, S. W., Satria, J., Sugiarto, A., Hardjito, D., & Antoni. (2016). The Use of Borax in Deterring Flash Setting of High Calcium Fly Ash Based Geopolymer. *Material Science Forum* 857 (2016), 416–420.
- Zhang, Z.H., Yang, T., & Wang, H. (2014). The effect of efflorescence on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer binders. *Southern Cross University 1*, 107–112.