

Pengaruh Penggunaan Lumpur Sidoarjo sebagai Substitusi Material *Fly Ash* pada Geopolimer

Kiki Yolanda Putri¹, Iskandar², Ruhana³, Miswar⁴, Amir Fauzi⁵

^{1,5}*Geopolymer and Green Technology Research Center, PNL, Lhokseumawe
Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA*

¹kikiyolanda956@gmail.com

⁵amirfauzi@pnl.ac.id

^{2,3,4}*Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe
Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA*

²iskandar_ts@pnl.ac.id

³ruhana@pnl.ac.id

⁴miswarsipil65@pnl.ac.id

Abstrak— Material lumpur sidoarjo (LS) berasal dari letusan pengeboran eksplorasi gas di Porong, Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia. Material lumpur sidoarjo dikenal sebagai material semen yang kaya akan kandungan Si dan Al. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengolah material lumpur sidoarjo dengan cara dikalsinasi dengan suhu yang tinggi. Namun, penyelidikan ini menyebabkan konsumsi energi, waktu produksi dan biaya produksi meningkat. Masalah ini menjadi perhatian dalam penelitian ini sehingga tidak menggunakan perlakuan kalsinasi dalam produksi lumpur sidoarjo. Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisis XRD menunjukkan material *fly ash* kaya akan kuarsa (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ atau $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) dan hematit (Fe_2O_3) sedangkan material lumpur sidoarjo mengandung kuarsa (SiO_2), mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ atau $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), magnetik (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3), dan rutil (TiO_2). Selanjutnya, analisis SEM menunjukkan bentuk partikel *fly ash* amorf dan bulat dengan permukaan berkarat. Permukaan *fly ash* ini menyebabkan penyerapan larutan alkali dan mengurangi *workability* dalam geopolimer mortar segar. Sementara itu, bentuk partikel lumpur sidoarjo berbentuk aglomerat tidak beraturan dengan permukaan kasar. Bentuk lumpur sidoarjo dianggap tidak mampu mengisi cekungan pengikat, sedangkan permukaan kasar menyebabkan penyerapan larutan alkali dalam mortar geopolimer segar. Penggunaan lumpur sidoarjo sebagai pengikat dalam geopolimer menyebabkan *setting time* yang lama dan kuat tekan tertinggi adalah sekitar 19,1 Mpa pada penggantian 10%.

Kata kunci— Lumpur Sidoarjo, XRF, XRD, FTIR, SEM

Abstract— The material of sidoarjo mud is generated from the volcano eruption of drilling gas in Porong, Sidoarjo, East Java, Indonesia. The material of sidoarjo mud was known as the cementitious material that was rich in content of Si and Al. Some studied were investigated to treat the material of sidoarjo mud by the calcination with high temperature. Yet, this investigation caused the consumption of energy, production time and increased production cost. The issue was a concern in this study so that did not use the calcination treatment in the production of sidoarjo mud. The results showed that the analysis of XRD indicated material of fly ash is rich in quartz (SiO_2), mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ or $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) dan hematite (Fe_2O_3), whereas the material of sidoarjo mud contained quartz (SiO_2), mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ or $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), magnetite (Fe_3O_4), hematite (Fe_2O_3), and rutile (TiO_2). Furthermore, the analysis of SEM showed that the particle of fly ash was amorphous and sphere with the misty surface. This surface of fly ash caused the absorption of an alkaline solution and reduced the workability in fresh mortar geopolymer. Also, the particle of sidoarjo mud was irregular agglomerate in shape with the rough surface. The shape of sidoarjo mud was considered not able to fill the concavity of binder, while the rough surface caused absorption of an alkaline solution in fresh geopolymer mortar. Use of sidoarjo mud as the binder in the geopolymer caused prolonged setting time and the highest compressive strength was about 19.1 MPa at the replacement of 10%.

Keywords— Sidoarjo mud, XRF, XRD, FTIR, SEM

I. PENDAHULUAN

Mortar dibuat dari campuran semen hidrolik dengan proporsi, air, semen, dan agregat halus. Namun pada kondisi tertentu, diperlukan tambahan bahan kimia atau mineral sebagai aditif. Semen hidrolik yang paling umum digunakan dalam bahan konstruksi adalah *ordinary portland cement* (OPC) [1]. Setiap tahun, kebutuhan OPC terus meningkat, seiring dengan meningkatnya jumlah konstruksi. Diperkirakan produksi OPC meningkat dari 1,5 miliar ton pada 1995 menjadi 2,2 juta ton pada 2010 [2]. Hal ini berdampak terhadap pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh peningkatan emisi CO_2 dari produksi OPC.

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh produksi OPC dikarenakan oleh efek gas rumah kaca CO_2 yang dilepaskan ke atmosfer melalui kalsinasi batu kapur dan pembakaran bahan bakar fosil selama pembuatan OPC yang diperkirakan satu ton untuk setiap ton OPC emisi CO_2 yang diproduksi. Lebih lanjut, jumlah energi yang diperlukan untuk

menghasilkan OPC dalam jumlah yang besar sehingga tidak termasuk sumber daya terbarukan [3].

Meningkatnya penggunaan OPC secara terus menerus menginspirasi peneliti untuk mencari solusi alternatif penggunaan OPC pada konstruksi, salah satunya dengan pemanfaatan *supplementary cementing materials* (SCM) seperti *fly ash* (FA), *silica fume* (SF), *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS), abu sekam padi dan metakaolin, yang diketahui memiliki sifat seperti semen sehingga dapat menjadi pengikat alternatif seperti halnya OPC [4].

SCM dapat ditemukan bebas dalam jumlah yang diinginkan yang berpotensi dapat dijadikan sebagai pengganti atau tambahan pada OPC. Dalam proses hidrasi OPC, SCM bereaksi dengan kalsium hidroksida dalam air yang ada untuk membentuk gel kalsium silikat hidrat (C-S-H). Proses ini disebut dengan reaksi pozzolan [5].

Pemanfaatan lain dari material SCM yakni dengan menggunakan cairan alkali yang berfungsi sebagai pengikat sehingga mampu menggantikan penggunaan OPC secara total dalam konstruksi. Seperti diketahui bahwa SCM dapat bereaksi

dengan silikat alumina yang diaktifkan dalam larutan alkali tinggi disebut dengan geopolimer.

Geopolimer adalah *green technology* yang dibentuk oleh polimerisasi silikon, aluminium dan spesies oksigen untuk membentuk struktur kerangka berimensi segitiga dimensi yang bersifat *amorf* yang terdiri dari ikatan Si-O-Al, yang merupakan salah satu ikatan kovalen paling stabil di alam [6]. Ada dua unsur utama penyusun geopolimer, yaitu material SCM dan larutan alkali. Pada dasarnya, material SCM mengandung alumina silika, yang kaya akan silikon (Si) dan alumina (Al). Sedangkan larutan alkali berasal dari logam alkali yang mudah larut biasanya berasal dari komponen natrium atau kalium [7].

Pada dekade terakhir abad ke-20, bahan geopolimer memiliki banyak sifat beton yang mampu melampaui kualitas beton normal seperti kekuatan tekan yang tinggi, penyusutan yang rendah dan ketahanan yang sangat baik terhadap serangan sulfat, ketahanan asam, dan *creep* yang rendah [8]. Karena keunggulan sifat ini, material geopolimer berpotensi menjadi salah satu material baru pada konstruksi yang mampu menarik minat peneliti untuk mengembangkan penyelidikan dalam hal geopolimer.

Lumpur Sidoarjo (LS) adalah letusan yang disebabkan oleh pengeboran eksplorasi gas di daerah Porong, Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia. Letusan tersebut mengeluarkan lumpur sebanyak $18 \times 10^4 \text{ m}^3$ per hari pada tahun 2007, dan kemungkinan terus berlanjut selama 25 hingga 30 tahun ke depan [7]. Sampai saat ini, volume tersebut telah merusak infrastruktur dan lingkungan yang menyebabkan gangguan sosial di masyarakat sekitar lokasi bencana. Hal tersebut menginspirasi peneliti untuk mencari solusi penggunaan LS pada konstruksi. Permasalahan yang dianalisa yaitu kelayakan material LS sebagai material bersifat semen dengan mengacu pada karakteristik material FA. Adapun tujuan penelitian ini yaitu untuk menyelidiki pengaruh penggunaan material LS yang tidak dibakar pada geopolimer mortar dengan mengacu kepada karakteristik material FA mortar geopolimer.

II. METODOLOGI PENELITIAN

Penyelidikan ini akan mengevaluasi struktur partikel dari material geopolimer yang akan dianalisis dengan menggunakan alat *x-ray fluorescence* (XRF), *x-ray diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi partikel dalam wujud kristal ataupun amorf, dan *scanning elektron mikroskope* (SEM) untuk mengidentifikasi bentuk dan permukaan partikel dari material.

Perencanaan *mix design* dalam penelitian ini bertujuan untuk menghitung proporsi material-material penyusun mortar geopolimer. Berdasarkan hasil dari pengujian karakteristik mortar menunjukkan bahwa material LS dan FA dapat digunakan sebagai material dalam campuran mortar, sehingga dapat ditentukan kebutuhan total volume material untuk pembuatan benda uji.

Material yang digunakan untuk membuat mortar geopolimer adalah material yang berasal dari lumpur sidoarjo yang dijadikan sebagai alternatif material substitusi *fly ash* pada mortar geopolimer. Sedangkan material lainnya merupakan pasir dan campuran larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) dengan rasio tertentu sebagai aktivator alkali yang digunakan secara bersama-sama dengan material utama untuk pengikat material lainnya. Material *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* yang berasal dari PLTU Nagan Raya, Aceh. Sedangkan material LS diperoleh dari Porong, Sidoarjo, Jawa Timur, Indonesia.

Kandungan utama material LS adalah SiO_2 dan Al_2O_3 yang lebih tinggi daripada FA, tetapi LS memiliki sedikit kandungan Ca. Kandungan kimia ini menghasilkan gel Si-O-Si, Si-O-Al, dan N-A-S-H dalam pengikat geopolimer. Partikel LS yang menggumpal tidak teratur dalam bentuk dan kasar di permukaan yang menyebabkan kurang bisa dikerjakan dalam campuran geopolimer segar. Secara keseluruhan material LS yang berbentuk gumpalan yang tidak beraturan dan didominasi antara $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ - $25,0 \text{ }\mu\text{m}$. Komposisi kimia FA sesuai dengan standar BS 450-1: 2007 dapat dilihat pada Tabel 1.

TABEL I
KOMPOSISI KIMIA MATERIAL FA DAN FS

Oxide	(%) by mass	
	FA	LS 700
Silicon dioxide (SiO_2)	24.9	32.5
Ferric oxide (Fe_2O_3)	32.2	26
Aluminium oxide (Al_2O_3)	10.3	11.1
Calcium oxide (CaO)	20.9	7.63
Chlorine oxide (Cl_2O)	0	5.31
Potassium oxide (K_2O)	2.8	4.25
Sulphur trioxide (SO_3)	0.7	1.24
Magnesium oxide (MgO)	2.08	1.07
Loss on ignition (LOI)	6.02	8.3

Komposisi kimia *fly ash* diketahui memiliki kandungan silika dioksida (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), besi (Fe_2O_3), dan kalsium (CaO) dalam jumlah yang tinggi, serta magnesium, potassium, sodium, titanium, sulfur, dalam jumlah kecil, seperti diketahui bahwa kandungan kimia *fly ash* tergantung dari tipe batu bara [9]. Kandungan kimia Si, Al, dan Ca dari material FA akan menghasilkan gel Si-O-Si dan Si-O-Al sebagai pengikat pada geopolimer. Sedangkan gel C-A-S-H dan N-A-S-H berkontribusi sebagai setting time. Selain itu, partikel FA pada umumnya adalah kaca di permukaan dan berbentuk bola yang dapat mempertahankan *workability* pada campuran geopolimer segar.

Dalam penelitian ini, agregat halus yang digunakan adalah pasir alami dengan butiran lolos saringan 4,8 mm serta sesuai dengan standar yang diisyaratkan pada SNI. Spesifikasi agregat halus yang akan digunakan adalah pasir yang berukuran $< 4,75 \text{ mm}$ dan berasal dari Krueng mane, Aceh utara.

Kombinasi larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) dipilih sebagai alkali aktivator. Natrium hidroksida dalam bentuk pelet dengan kemurnian 99%, Larutan natrium hidroksida dibuat dengan melarutkan pelet natrium hidroksida dalam aquades. Pellet NaOH dan cairan gel Na_2SiO_3 dengan molar tertentu. Banyaknya pellet NaOH yang dicampurkan dengan air, tergantung dengan molaritas yang digunakan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material

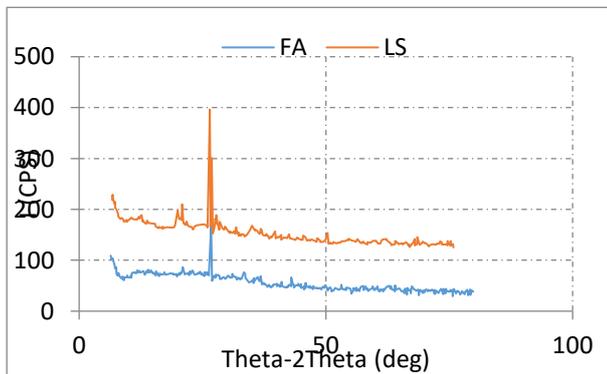
X-Ray Fluorescence (XRF), dari hasil uji XRF seperti terlihat pada tabel 1, jumlah kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 73.56 % , hal ini menunjukkan bahwa *fly ash* PLTU Nagan Raya yang digunakan dalam penelitian ini dikategorikan dalam golongan *fly ash* kelas F sesuai dengan standar (ACI *Manual of Concrete Practice* 1993 Part 1 226.3R-3), namun

dengan kandungan CaO sebesar 8,72% memperlihatkan bahwa ada kecenderungan meningkatnya reaktifitas yang mendekati dengan *fly ash* golongan kelas C yang berpengaruh pada waktu pengikatan mortar.

TABEL II
HASIL UJI XRF FLY ASH PLTU NAGAN RAYA

No	Senyawa kimia	Persentase kandungan
1	SiO ₂	37.16
2	Al ₂ O ₃	17.61
3	Fe ₂ O ₃	18.75
4	CaO	8.72
5	Na ₂ O	0.468
6	K ₂ O	0.788
7	TiO ₂	0.747
8	MgO	6.43
9	P ₂ O ₅	0.139
10	SO ₃	1.96

X-ray diffraction (XRD), gambar 1 menunjukkan spektrum XRD FA dan LS akan merujuk ke puncak dispersi yang sama dengan pola referensi untuk mengidentifikasi konstituen mineral utama dari material. Spektrum XRD menunjukkan bahwa mineral utama material FA terdiri dari kuarsa (SiO₂), mullit (3Al₂O₃ 2SiO₂ atau 2Al₂O₃ SiO₂) dan hematit (Fe₂O₃) sedangkan mineral utama LS terdiri dari kuarsa (SiO₂), mullit (3Al₂O₃ 2SiO₂ atau 2Al₂O₃ SiO₂), magnetite (Fe₃O₄), hematite (Fe₂O₃), dan rutile (TiO₂).

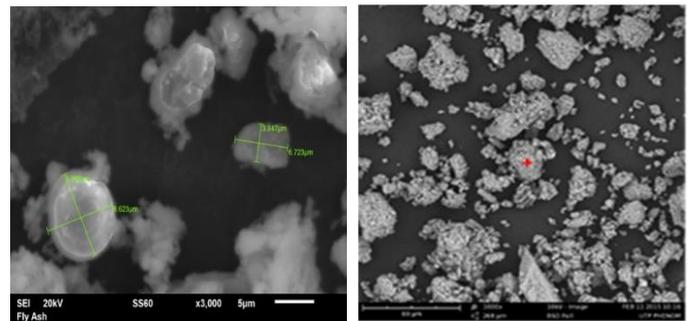


Gambar 1. Grafik XRD dari material FA dan Lumpur Sidoarjo

Scanning Electron Microscopy (SEM), gambar 2a menunjukkan bentuk permukaan partikel FA yang terdiri dari bentuk partikel bola amorf, ramping kaca, dan berakut. Karakteristik partikel FA ini memiliki keunggulan masing-masing dalam proses geopolimer. Misalnya, bola amorf FA sebagai pengisi yang baik dalam rongga yang dibentuk oleh gel Si-O-Si dan Si-O-Al. Sedangkan permukaan FA yang berakut menyebabkan penyerapan larutan alkali oleh permukaan partikel FA, sehingga terjadi penurunan *workability* pada geopolimer segar.

Selanjutnya, gambar 2b menunjukkan bentuk partikel LS yang terdiri dari permukaan kasar dengan bentuk yang tidak beraturan. Bentuk partikel LS yang tidak beraturan dianggap tidak mampu mengisi dengan sempurna rongga yang dihasilkan oleh gel Si-O-Si dan Si-O-Al dibandingkan partikel FA. Hal ini dikaitkan dengan bentuk yang tidak teratur dari material LS sedangkan partikel FA adalah bentuk bola amorf. Selain itu,

permukaan kasar LS menyerap larutan alkali lebih banyak dalam campuran segar sehingga menyebabkan penurunan *workability* pada campuran geopolimer.

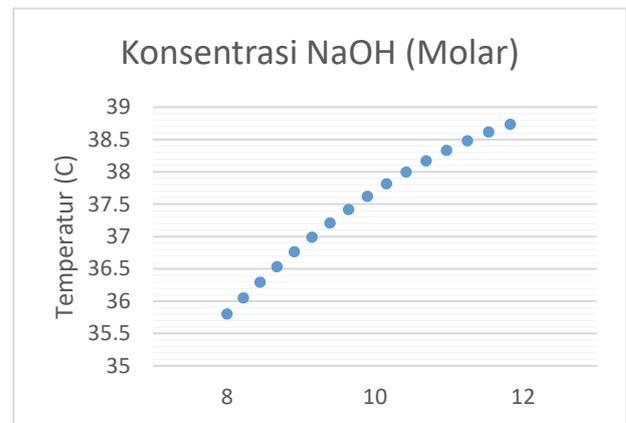


2(a) 2(b)

Gambar 2 Permukaan dan identifikasi kimia *fly ash* dan lumpur sidoarjo

B. *Optimalisasi Konsentrasi NaOH dan Rasio Na₂SiO₃/NaOH*

Larutan NaOH, gambar 4 menunjukkan efek konsentrasi NaOH pada suhu pemanasan. Peningkatan konsentrasi NaOH dalam kisaran 8M hingga 12M menyebabkan peningkatan suhu larutan NaOH. Hal ini disebabkan oleh reaksi pelet dan air yang menyebabkan pemisahan ion Na⁺ dan OH⁻ oleh polaritas molekul air. Reaksi ini disebut sebagai reaksi eksotermik. Panas yang dilepaskan sebagai akibat pelepasan energi daritekanan yang tinggi ke yang lebih rendah. Peningkatan konsentrasi NaOH menyebabkan meningkatnya jumlah ion Na⁺ dan OH⁻ dalam molekul air dan akan melepaskan panas.



Gambar 3 Pengaruh konsentrasi NaOH pada suhu pemanasan

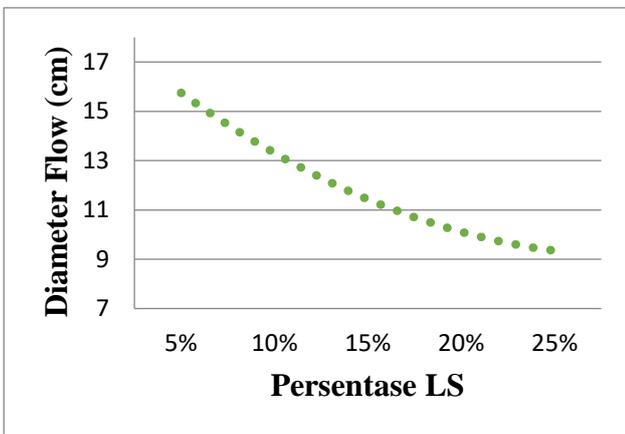


Gambar 4 Pengaruh konsentrasi NaOH pada suhu pemanasan larutan alkali

Gambar 4 menunjukkan efek konsentrasi NaOH pada suhu pemanasan larutan alkali. Terlihat bahwa suhu larutan NaOH dilepaskan kembali ketika dicampur dengan larutan Na_2SiO_3 . Namun, suhu larutan alkali lebih rendah dari larutan NaOH. Hal ini disebabkan oleh reaksi eksotermal larutan NaOH dan Na_2SiO_3 yang menghasilkan pemisahan ion Na^+ dan SiO^+ dengan polaritas beberapa molekul air dalam larutan alkali. Pelepasan suhu dalam larutan alkali yang disebabkan oleh ion SiO^+ menghasilkan stabilitas yang luar biasa dalam keadaan energi yang rendah.

C. *Workability*

Workability campuran geopolimer segar sangat dipengaruhi oleh permukaan partikel dari material. Permukaan FA yang berkarat menyebabkan penyerapan larutan alkali oleh permukaan partikel FA. Ini berarti bahwa material FA akan menurunkan *workability* mempertahankan kemampuan kerja dalam campuran segar. Selain itu, larutan alkali juga memainkan peran penting dalam peningkatan *workability*. Hal ini disebabkan pelumasan larutan alkali yang memberikan viskositas (kekentalan) dalam campuran geopolimer segar.



Gambar 5 *Workability* mortar geopolimer gabungan LS dan FA

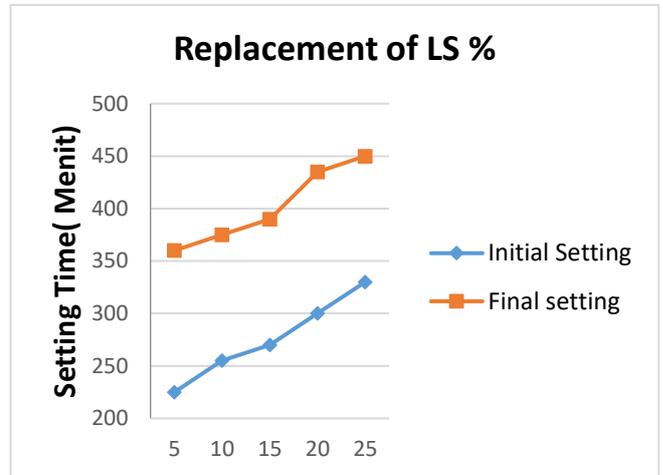
Gambar 5 menunjukkan bahwa penambahan persentase material LS pada geopolimer berbahan dasar FA menyebabkan penurunan *workability*. Hal ini dikaitkan dengan permukaan yang kasar pada LS yang menyerap larutan alkali. Sehingga peningkatan jumlah material LS meningkatkan permukaan kasar yang ada pada campuran mortar geopolimer. Peningkatan permukaan ini menyebabkan meningkatnya penyerapan larutan alkali, sehingga memperkecil *workability*.

D. *Setting Time*

Optimalisasi konsentrasi NaOH dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ pada *setting time* diperlukan untuk memahami proses geopolimer dari keadaan plastis ke keadaan statis (mengeras). *Final setting time* dari campuran geopolimer segar tergantung pada kandungan Ca dari material dan larutan basa dalam campuran geopolimer segar. Diketahui bahwa konsentrasi larutan NaOH yang tinggi dan rasio larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ menyebabkan penurunan *setting time* pada geopolimer. Hal ini dikaitkan pada konsentrasi tinggi larutan NaOH yang meningkatkan disolusi dalam larutan alkali. Peningkatan laju disolusi mempercepat *setting time* mortar geopolimer segar.

Lebih lanjut, rasio tinggi larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ menyebabkan campuran geopolimer segar lebih kental sehingga akan menjadi kaku dan mengeras dalam waktu

singkat. Efek konsentrasi NaOH dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ pada *setting time* ditampilkan pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4. Terlihat bahwa peningkatan konsentrasi NaOH dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dalam campuran geopolimer segar menyebabkan penurunan *final setting time*.



Gambar 6 *Setting time* mortar geopolimer gabungan POFA dan FA

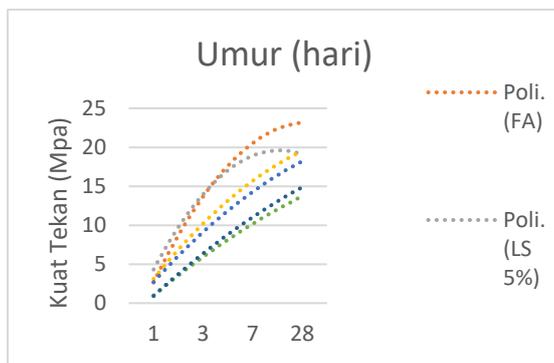
Gambar 6 menunjukkan bahwa penambahan penggunaan material LS menyebabkan *setting time* yang lebih panjang. Hal ini dikarenakan kandungan Ca yang ada dalam material LS yang meningkat. Perlu diketahui bahwa dengan tergantungnya material FA dengan material LS menyebabkan perubahan jumlah kandungan Ca dari klasifikasi *high content* menjadi *low content*.

E. Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dalam penelitian ini digunakan benda uji kubus beton mortar geopolimer berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm. Untuk efek penggantian POFA pada kuat tekan dengan larutan alkali yang sama dan untuk rasio pengikat yang sama dapat dilihat pada Gambar 8 Hasil kuat tekan yang didapat adalah berdasarkan benda uji tersebut. Berikut hasil pengujian kuat tekan dari beton mortar geopolimer.

TABEL III
NILAI HASIL KUAT TEKAN PENGGABUNGAN
MATERIAL LS DENGAN FA

Type	Kuat Tekan			
	1	3	7	28
FA	2,8	13,2	21	23
LS 5%	4,3	14	18,9	19,1
LS 10%	3,5	9	16,9	19,1
LS 15%	3,2	7,6	15,8	17,7
LS 20%	1,2	5,3	10,8	13,5
LS 25%	1,2	5,5	11,9	14,6



Gambar 7 Hasil pengujian kuat tekan penggabungan material LS dengan FA

Gambar 7 menunjukkan bahwa kuat tekan maksimum pada geopolimer yang berbahan FA adalah 24 Mpa, sedangkan kuat tekan maksimum terjadi pada penggunaan material POFA 5% sebesar 23 Mpa. Lebih lanjut, Gambar 4.8 menunjukkan bahwa kuat tekan maksimum pada geopolimer yang berbahan FA adalah 23 Mpa, sedangkan kuat tekan maksimum terjadi pada penggunaan material LS 5% sebesar 19,1 Mpa. Lebih lanjut, kenaikan material LS pada geopolimer berbahan FA menunjukkan penurunan kuat tekan. Hal ini dikarenakan kenaikan persentase material LS menunjukkan kandungan Ca lebih meningkat, Sehingga memperlambat *setting time* yang berdampak kepada kuat tekan.

IV. KESIMPULAN

Analisa SEM menunjukkan bentuk permukaan partikel FA yang terdiri dari bentuk partikel bola amorf, ramping kaca, dan berkabut. Permukaan FA yang berkabut menyebabkan penyerapan larutan alkali oleh permukaan partikel FA, sehingga terjadi penurunan *workability* pada geopolimer segar. Bentuk partikel LS yang terdiri dari permukaan kasar dengan bentuk yang tidak beraturan dianggap tidak mampu mengisi dengan sempurna rongga yang dihasilkan oleh gel Si-O-Si dan Si-O-Al dibandingkan partikel FA. Selain itu, permukaan LS yang kasar dapat menyerap larutan alkali lebih banyak dalam campuran segar sehingga menyebabkan penurunan *workability* pada campuran geopolimer.

Spektrum XRD menunjukkan bahwa mineral utama material FA terdiri dari kuarsa (SiO₂), mullit (3Al₂O₃ 2SiO₂ atau 2Al₂O₃ SiO₂) dan hematit (Fe₂O₃) sedangkan mineral utama LS terdiri dari kuarsa (SiO₂), mullit (3Al₂O₃ 2SiO₂ atau 2Al₂O₃ SiO₂), magnetite (Fe₃O₄), hematite (Fe₂O₃), dan rutile (TiO₂). Material LS kaya kandungan Si dan Al tetapi sedikit kandungan Ca dibandingkan dengan material FA. Ini berarti bahwa material LS menghasilkan lebih banyak gel Si-O-Si dan Si O-Al dalam pengikat geopolimer yang memberikan sifat mekanik yang lebih baik, terutama dalam kuat tekan. Namun, menghasilkan gel N-A-S-H dalam pengikat geopolimer yang menyebabkan *setting time* yang lama.

Berdasarkan rasio Na₂SiO₃/NaOH masing-masing 2,5, 3,0, 3,5 dan 4,0, dan konsentrasi NaOH 8M, 10M, dan 12M dalam larutan alkali. Didapatkan konsentrasi larutan NaOH yang optimal sebesar 10M dan rasio Na₂SiO₃/NaOH 4,0. Komposisi ini dipilih sebagai patokan untuk desain campuran akhir dalam penelitian ini. Pengaruh penggantian FA dengan LS pada mortar geopolimer didapatkan hasil kuat tekan optimum umur 28 hari pada campuran penggantian 5% sebesar 19,1 MPa, penggantian 10% sebesar 19, 1 MPa, Penggantian 15% sebesar 17,7 MPa, penggantian 20% sebesar 13,5 MPa, dan penggantian 25% sebesar 25%.

REFERENSI

- [1] E-701. 2013. "Cementitious materials for concrete". *America Concrete Institute*.
- [2] Malhotra, V.M. 1999. "Making concrete "greener" with fly ash". *ACI's Concrete International*. 21(5): p. 61-66.
- [3] Davidovits, J. 2013. "Geopolymer cement". *Institute Geopolymer*. France.
- [4] Ahmed, M.F., M.F. Nuruddin, and N. Shafiq. 2011. "Compressive strength and workability characteristics of low-calcium fly ash-based self-compacting geopolymer concrete". *Word Academy of Science, Engineering and Technology*, 5(2): p. 8-14.
- [5] Dustan, E.R. 2011. "How does pozzolanic reaction make concrete "green"". *World of Coal Ash (WOCA) Conference*, in Denver, CO, USA.
- [6] Antoni, et al. 2012. "Influence of heat treatment temperature, particle fineness and replacement ratio of sidoarjo mud as pozzolanic material". *The 5th International Conference of Asian Concrete Federation*.
- [7] Davies, R.J., et al. 2011. "Probabilistic longevity estimate for the LUSI mud volcano, East Java". *Journal of the Geological Society*. 168: p. 517-523.
- [8] Van Jaarsveld., Van Deventer., and Lukey, G.C. 2003. "The characterisation of source materials in fly ash-based geopolimer". *Materials Letters*, 57(7): p. 1272-1280.
- [9] Manuahe, 2014. "Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang (*fly ash*)". Skripsi Program S1 Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado.