

PENGARUH PENGGUNAAN FLY ASH PLTU PANGKALAN SUSU TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER

Amir Fauzi¹, Ahmad Muladi Keliat², Edi Majuar³, Cut Nurmala Hajani⁴, Syukri⁵, Herri Mahyar⁶, Iskandar⁷, Mirza Fahmi⁸

Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe
Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

amirfauzi@pnl.ac.id, ahmadmuladik@gmail.com, emkl04@yahoo.com, cut.nurmala02@gmail.com, syukri@pnl.ac.id, herrimahyar@pnl.ac.id, iskandar_ts@pnl.ac.id, mirzafahmi@pnl.ac.id

Abstrak—Material dasar pada mortar geopolimer berasal dari limbah industri yang mengandung unsur-unsur *pozzolanic* yang memiliki sifat sama dengan senyawa semen. *Fly ash* yang berasal dari PLTU Pangkalan Susu merupakan limbah dari pembakaran batu bara yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik pada PLTU. Berdasarkan hasil dari penelitian, *fly ash* PLTU Pangkalan Susu tergolong kepada *fly ash* tipe C dengan kandungan 34,81% SiO₂, 25,39% CaO, 14,92% Al₂O₃, 16,49% Fe₂O₃ dan 4,92% MgO serta total senyawa SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ adalah 66,22%. Penelitian ini menggunakan 3 variasi molaritas NaOH yaitu: 8M, 10M dan 12M dengan rasio larutan alkalin terhadap *fly ash* Pangkalan Susu sebesar 0,6 dan rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2,0; 2,5; 3,0; dan 3,5. Hasil menunjukkan penurunan *workability* pada larutan NaOH dengan konsentrasi 8M dan 10M berturut-turut sebesar dari 19,5 cm - 14,75, 18 cm - 17 cm sedangkan *workability* pada larutan NaOH dengan konsentrasi 12M mengalami peningkatan dari 18 cm ke 19,75 cm. Peningkatan molaritas NaOH yang lebih tinggi menyebabkan kenaikan reaksi larutan alkalin pada campuran mortar geopolimer yang memiliki pengaruh terhadap *workability* mortar geopolimer. *Setting time* yang terjadi pada geopolimer berbahan FAPS dengan konsentrasi larutan NaOH 8M, 10M, dan 12M berturut-turut terjadi pada waktu 40 - 50 menit, 35 - 45 menit, dan 30 - 45 menit yang mana keseluruhan *setting time* terlihat kurang dari 60 menit (*short setting time*). Kuat tekan optimum sebesar 52,23 MPa pada penggunaan molaritas NaOH sebesar 10M dengan rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2,5. Kesimpulan dari penelitian ini adalah penggunaan FAPS pada material geopolimer mempengaruhi terhadap kuat tekan.

Kata Kunci: Geopolimer, XRF, SEM, *Workability*, *Setting Time*, Kuat Tekan

I. PENDAHULUAN

Ordinary portland cement (OPC) banyak digunakan sebagai bahan pengikat beton yang digunakan dalam konstruksi. Produksi OPC dalam skala besar telah menyebabkan polusi pada lingkungan. Setiap tahun, jutaan ton semen yang diproduksi di seluruh dunia telah menyebabkan terjadinya peningkatan yang signifikan terhadap polusi CO₂ di lingkungan, sebab dalam produksinya mengeluarkan emisi gas CO₂ yang besar (produksi 1ton klinker OPC menghasilkan 1 ton CO₂),. Untuk mengatasi masalah ini, penggunaan limbah industri yang memiliki sifat semen (cementitious) sebagai alternatif material pada beton menjadi sesuatu yang menarik untuk diteliti. Salah satunya dengan penggunaan *green technology* yang lebih dikenal dengan istilah geopolimer. Teknologi ini dapat mengurangi polusi dari CO₂ sebesar 4% sampai 8 % dikarenakan dalam pembuatan geopolimer tidak menggunakan OPC sebagai bahan pengikat pada beton.

Geopolimer mortar adalah bahan polimer anorganik yang didasarkan pada kandungan alumina, silikat dan kalsium. Pengikat pada geopolimer diproduksi dari senyawa *pozzolanic* dengan larutan aktivator alkali yang terdiri dari natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃). Pengikat ini diaktifkan dengan basa bersifat ramah lingkungan, di mana produksinya menghabiskan

sedikit energi. Limbah industri yang dapat digunakan untuk material geopolimer haruslah mengandung silika (Si), aluminium (Al) dan kalsium (Ca). Dimana senyawa-senyawa ini akan bereaksi dengan larutan alkalin aktifator yang membentuk gel Si-O-Si dan Si-O-Al yang berkontribusi pada sifat mekanik beton, serta gel C-A-S-H atau N-A-S-H yang berkontribusi pada *setting time*. Ada dua unsur utama penyusun geopolimer, yaitu material *pozzolanik* dan larutan alkali. Pada dasarnya, material *pozzolanok* 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 (Na) atau kalium (K).

Salah satu material *pozzolanik* yang paling dikenal dan mempunyai peluang untuk menggantikan OPC adalah material *fly ash*. Material ini merupakan material limbah yang di hasilkan dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Material *fly ash* diyakini memiliki sifat seperti senyawa kimia semen karena didalamnya terkandung silika, alumina, dan kalsium yang mampu memberikan ikatan yang kuat pada geopolimer. Nyatanya, sampai saat ini *fly ash* masih dikategorikan sebagai limbah. Sehingga, pemanfaatan limbah yang dihasilkan sudah menjadi kewajiban untuk dicari solusi secepatnya. Pembangkit listrik yang berada di provinsi

Sumatera Utara, kabupaten Langkat khususnya. Menurut data yang diperoleh, pembangkit ini telah mensuplay *fly ash* dalam jumlah yang besar dan ini telah berdampak signifikan terhadap lingkungan dan masyarakat.

Karena dilatar belakangi hal tersebut maka akan dilakukan sebuah penelitian yang berjudul “Pengaruh Penggunaan Fly Ash PLTU Pangkalan Susu Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer”.

II. METODOLOGI

Penyelidikan ini akan mengevaluasi struktur partikel dari material dan menganalisis sifat material serta penguji geopolimer mengidentifikasi fase kristalin dalam material dengan cara menentukan parameter struktur kristalin serta untuk mendapatkan ukuran partikel *fly ash*. *Scanning elektron mikroskop (SEM)* adalah pengujian yang digunakan untuk mengidentifikasi bentuk dan permukaan partikel dari material *fly ash*

Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui sifat fisik material, mix design campuran geopolimer, dan sifat mekanik mortar geopolimer. Material geopolimer diamati berdasarkan pada identifikasi jenis ikatan, dan gambar permukaan. Mix design campuran geopolimer segar dievaluasi berdasarkan *setting time* dan *workability*. Sedangkan sifat mekanik mortar geopolimer diidentifikasi melalui kuat tekan.

Material yang digunakan untuk membuat mortar geopolimer adalah material yang berasal dari limbah pembakaran batu bara (*fly ash*) yang dijadikan sebagai alternatif pengganti semen pada mortar geopolimer. Sedangkan material lainnya merupakan campuran larutan natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃) 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 Pangkalan Susu, Sumatera Utara.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material

1. Komposisi Kimia Material Fly Ash Pangkalan Susu (FAPS)

Untuk komposisi kimia terhadap FA yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada table 1

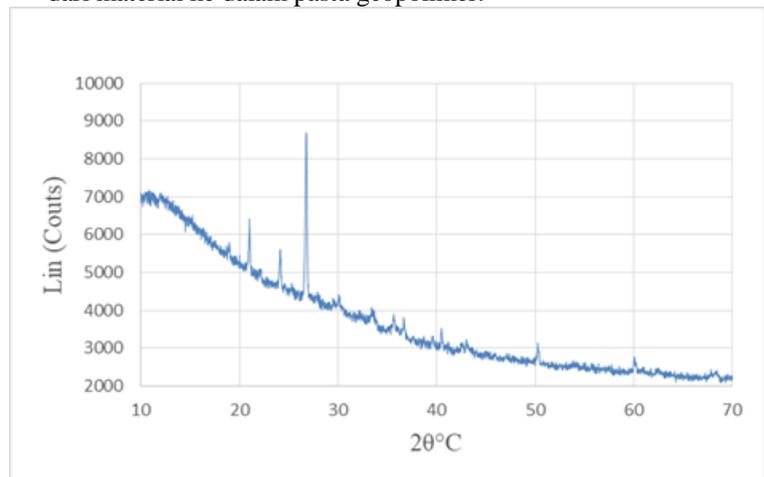
TABEL 1 PERSENTASE KOMPOSISI KIMIA DARI FAPS

Senyawa Kandungan	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Ti	Mg	P	S
Persentase Kandungan (%)	34,81	14,92	16,49	25,39	0,468	0,788	0,747	4,92	0,139	1,96

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan fly ash PLTU Pangkalan Susu tergolong ke fly ash kelas C dikarenakan didalamnya terkandung 34,81% SiO₂, 25,39% CaO, 14,92% Al₂O₃, 16,49% Fe₂O₃ dan 4,92% MgO dengan total senyawa SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ adalah 66,22%. Dari data tersebut terlihat bahwa fly ash

pangkalan susu (FAPS) kaya akan kandungan kimia SiO₂, Al₂O₃ dan CaO mengakibatkan reaksi yang cepat pada mortar geopolimer berbahan *fly ash* Pangkalan Susu. Reaksi cepat yang terjadi pada FAPS di mortar geopolimer akan berkontribusi pada tingginya kuat tekan awal yang terjadi pada mortar geopolimer. Selain itu, percepatan reaksi ini akan berkontribusi dengan produktifitas produk yang dihasilkan.

2. Analisis Kristal pada Material dan Pasta Geopolimer
 Identifikasi kristal material dan pasta geopolimer diselidiki oleh analisis XRD seperti yang terlihat pada gambar 1 penelitian ini menggambarkan kinerja (FAPS) dari material ke dalam pasta geopolimer.



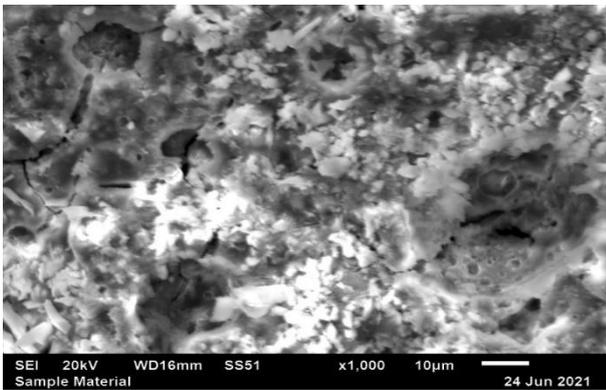
Gambar 1 Pola XRD Pada Pasta FAPS Geopolimer

puncak utama dari pasta *fly ash* Pangkalan Susu yang berada pada daerah 20 sampai 30 2θ (°C) tepatnya pada daerah 26 sampai 28 2θ (°C). Daerah ini menunjukkan bahwa pasta *fly ash* Pangkalan Susu memiliki komposisi kimia utama pada *Quartz* (Si) yang bersifat amorf sedangkan pada puncak-puncak yang kecil menunjukkan adanya senyawa kimia *Mullite* (Fe) dan *Magnetite* (Al). Lebih lanjut, grafik menunjukkan bahwa pasta *fly ash* Pangkalan Susu memungkinkan untuk dijadikan sebagai pasta dalam ikatan geopolimer. Ini dikaitkan kepada material *fly ash* Pangkalan Susu yang memiliki tingkat geopolimerisasi yang tinggi dalam membentuk pasta.

Pembentukan gel Si-O-Si dan Si-O-Al yang dihasilkan oleh reaksi alkali dari jenis natrium dan unsur Si dan Al yang terkandung dalam bahan tersebut. Pasta ini berperan sebagai pengikat dalam sistem geopolimerisasi yang berkontribusi terhadap sifat mekanik geopolimer.

3. Identifikasi Bentuk dan Permukaan Fly Ash

Bentuk partikel dan elemen utama *fly ash* diamati dengan alat *Scanning Electron Microscopy (SEM)*.



Gambar 2 Permukaan FAPS Geopolimer

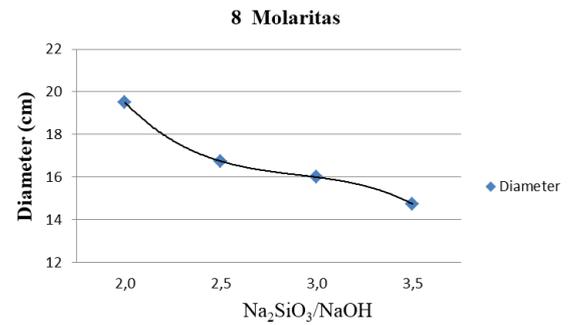
Gambar 2 menunjukkan gambar bentuk dan permukaan partikel *fly ash*. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pasta geopolimer memiliki kepadatan permukaan yang disebabkan oleh pembentukan gel Si-O-Si dan gel Si-O-Al. Kepadatan ini terbentuk dari banyaknya gel yang terjadi selama reaksi yang terbentuk.

Kandungan Si dan Al yang tinggi berkontribusi terhadap kenaikan gel yang sudah tentu akan menaikkan kuat tekan pasta geopolimer yang terjadi. Bentuk partikel *fly ash* Pangkalan Susu yang bulat seperti bola diyakini memiliki manfaat tersendiri. Dari banyaknya partikel *fly ash* Pangkalan Susu yang bereaksi dengan larutan alkali, terdapat sebagian dari partikel tersebut yang tidak bereaksi. Hal ini disebabkan oleh jumlah partikel yang bereaksi telah memiliki kontak dengan larutan alkali. Sehingga partikel *fly ash* Pangkalan Susu yang tidak bereaksi akan berfungsi sebagai filler (pengisi) pada *concavity* dari gel yang terbentuk. *Concavity* terjadi akibat terlepasnya sebagian kandungan O selama reaksi geopolimer. Partikel *fly ash* Pangkalan Susu yang mengisi *concavity* diyakini akan menambah kepadatan gel yang terbentuk sehingga meningkatkan nilai kuat tekan geopolimer yang terjadi.

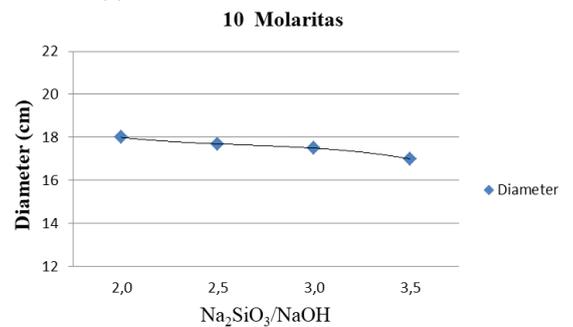
B. Workability

Workability merupakan campuran geopolimer segar yang dipengaruhi oleh permukaan partikel dari material. Permukaan FAPS yang licin seperti kaca menyebabkan penyerapan larutan alkali (LA) tidak terjadi dalam waktu yang singkat. Sehingga *workability* yang terjadi dapat dipertahankan selama reaksi geopolimer. Namun, penggunaan molaritas NaOH dan rasio Na₂SiO₃ terhadap NaOH menyebabkan terjadinya perubahan pada *workability* pada mortar segar geopolimer. Perubahan *workability* ini dapat terlihat pada gambar 3a – 3c. Kenaikan molaritas NaOH dari 8M sampai 10M dan kenaikan rasio Na₂SiO₃ terhadap NaOH berkontribusi terhadap kenaikan *workability*. Ada keunikan yang terjadi pada *workability* larutan NaOH 8M, 10M, dan 12M dimana semakin meningkatnya molaritas *workability* yang terjadi pada penggunaan larutan alaklin dengan rasio Na₂SiO₃ terhadap NaOH perlahan naik. Hal ini dikaitkan dengan tingginya molaritas yang menyebabkan pencairan *viscosity* larutan alkalin semakin tinggi. Seperti diketahui, bahwa larutan alkalin memiliki peran penting dalam penurunan

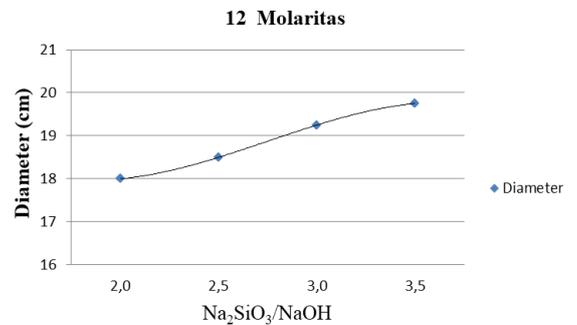
workability. Hal ini dikaitkan dengan viskositas mortar segar dengan kehadiran larutan alkalin.



Gambar.(a)



Gambar (b)



Gambar (c)

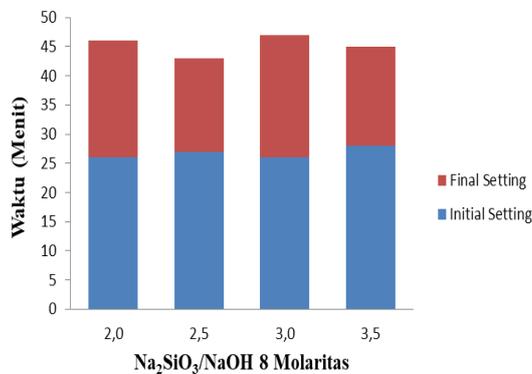
Gambar 3(a) *Workability* 8M; Gambar 3(b) *Workability* 10M; Gambar 3(c) *Workability* 12M

Larutan alkalin diketahui lebih kental dibandingkan dengan air yang berkontribusi terhadap sifat kohesif yang melekat dalam campuran geopolimer segar dibandingkan dengan campuran konvensional. Viskositas larutan alkalin dihasilkan dengan konsentrasi larutan NaOH dan rasio Na₂SiO₃/NaOH. Larutan NaOH dengan konsentrasi tinggi memberikan laju disolusi tinggi yang meningkatkan viskositas larutan basa. Sedangkan, rasio tinggi Na₂SiO₃/NaOH berkontribusi terhadap sifat viskos yang lebih segar pada campuran geopolimer segar. Sehingga, kedua parameter ini menyebabkan pengurangan *workability* dalam campuran geopolimer segar seperti yang di ilustrasikan pada. Gambar 3a *Workability* Mortar Geopolimer 8 Molaritas. Pada ketiga gambar dar 3a; 3b; dan 3c menunjukkan bahwa terjadi perlawanan pola pada

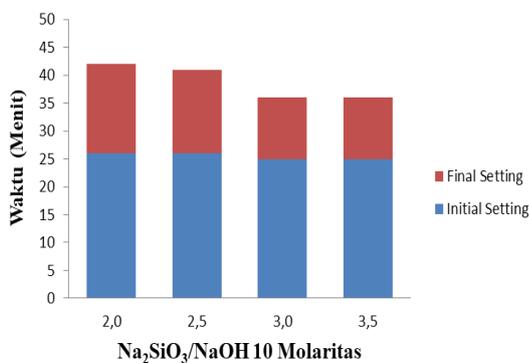
workability 12M, yang mana terjadi kenaikan diameter aliran pada molaritas yang lebih tinggi. Hal ini dikaitkan dengan peningkatan molaritas NaOH yang lebih tinggi yang menyebabkan kenaikan reaksi larutan alkalin dari campuran. Gambar 3a; 3b dan 3c menunjukkan kenaikan molaritas menyebabkan peningkatan diameter aliran campuran mortar segar.

C. *Setting Time*

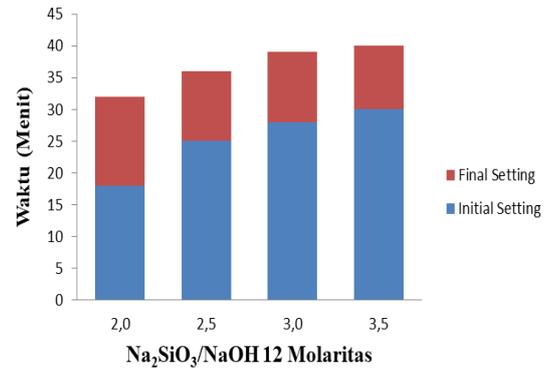
Optimalisasi konsentrasi NaOH dengan rasio $Na_2SiO_3/NaOH$ pada *setting time* diperlukan untuk memahami proses geopolimer dari keadaan plastis ke keadaan statis (mengeras). *Setting time* dari campuran geopolimer segar tergantung pada kandungan Ca dari material dan larutan basa dalam campuran geopolimer segar. Diketahui bahwa konsentrasi larutan NaOH yang tinggi dan rasio larutan $Na_2SiO_3/NaOH$ menyebabkan penurunan *setting time* pada geopolimer. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi larutan NaOH pada material FAPS menyebabkan peningkatan laju reaksi antara FAPS dengan LA sehingga berpengaruh terhadap percepatan *setting time* mortar geopolimer segar. Lebih lanjut, rasio $Na_2SiO_3/NaOH$ yang tinggi menyebabkan campuran geopolimer segar lebih kental sehingga akan menjadi lebih kaku dan akan mengeras dalam waktu singkat.



Gambar (a)



Gambar (b)



Gambar (c)

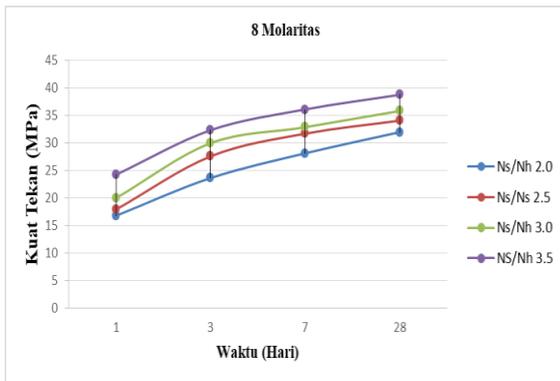
Gambar 4a. *Setting time* 8M; Gambar 4b. *Setting time* 10M; Gambar 4c. *Setting time* 12M

Berdasarkan gambar 4a; 4b dan 4c menunjukkan *setting time* yang terjadi pada geopolimer berbahan FAPS rata-rata sebesar 45-50 menit pada 8M, sebesar 35-45 menit pada 10M dan 35-45 menit pada 12M, yang mana rata-rata waktu *initial setting time* lebih tinggi di bandingkan dengan waktu *final setting time*. Ini dihubungkan dengan reaksi yang terjadi pada akhir lebih cepat di bandingkan dengan reaksi di awal. Selain itu, kandungan kalsium (Ca) yang tinggi pada FAPS juga menyebabkan terjadinya percepatan reaksi yang terjadi pada campuran geopolimer.

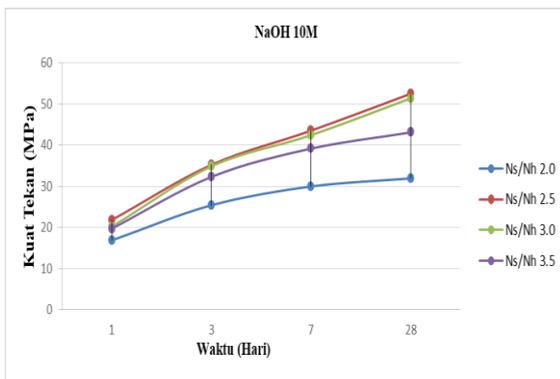
Gambar juga menunjukkan bahwa *initial setting time* yang terjadi pada rasio Na_2SiO_3 terhadap NaOH dari 2.0 sampai 3.5 tidak mengalami perubahan yang signifikan. Namun, *final setting time* yang terjadi mengalami penurunan. Hal ini disebabkan viskositas yang tinggi yang terjadi pada larutan alkalin yang memiliki rasio $Na_2SiO_3/NaOH$ yang mempercepat sisa reaksi geopolimer yang terjadi. Hal ini dikaitkan dengan kenaikan molaritas yang bereaksi dengan larutan alkalin yang memiliki viskositas tinggi akan mengurangi viskositas yang terjadi sehingga mortar segar terlihat lebih mencair.

D. *Kuat Tekan*

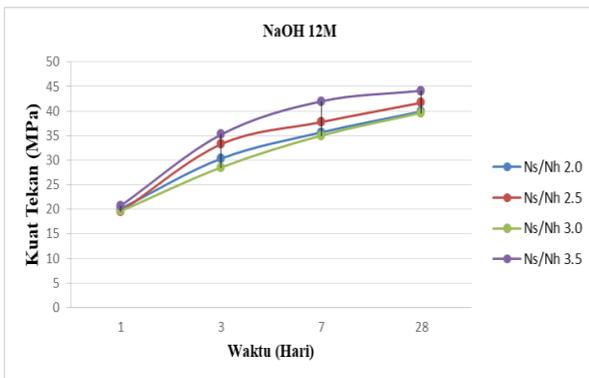
Pengujian kuat tekan dalam penelitian ini menggunakan benda uji kubus mortar dengan ukuran 50mm x 50mm x 50mm. Prosedur pelaksanaan kuat uji tekan mortar geopolimer mengacu kepada prosedur kuat tekan mortar OPC. Namun, mortar geopolimer tidak mengalami perendaman sebelum pengujian. Hal ini dikarenakan sifat reaksi geopolimer yang bukan berasal dari proses hidrasi.



Gambar (a)



Gambar (b)



Gambar (c)

Gambar 5a. Kuat Tekan 8M; Gambar 5b. Kuat Tekan 10M; Gambar 5c. Kuat Tekan 12M

Gambar 5a. menunjukkan hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan larutan NaOH 8 M dan variasi rasio LA terhadap FAPS sebesar 0,6 didapat kuat tekan optimum sebesar 38,80 MPa yang terjadi pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 3,5. Namun, kuat tekan minimum yang terjadi pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,0 dengan besaran 32,00 MPa. Hal ini dikaitkan dengan makin tingginya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ meningkatkan jumlah Na_2SiO_3 yang digunakan dalam larutan alkalin yang berkontribusi terhadap penambahan ikatan gel Si-O-Si dan Si-O-Al dalam ikatan kimia geopolimer. Lebih lanjut, kandungan Ca yang tinggi yang mempercepat reaksi juga membantu peningkatan kuat tekan geopolimer.

Gambar 5b. menunjukkan hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan larutan NaOH 10M dan variasi rasio LA terhadap FAPS sebesar 0,6. Perolehan kuat tekan optimum sebesar 52,23 MPa terjadi pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5. Sedangkan perolehan nilai kuat tekan minimum sebesar 31,96 MPa terjadi pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,0. Trend kenaikan kuat tekan ini juga dikaitkan dengan semakin tingginya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ menaikkan jumlah Na_2SiO_3 yang digunakan dalam larutan alkalin yang mendukung terhadap penambahan ikatan gel Si-O-Si dan Si-O-Al dalam ikatan kimia geopolimer. Lebih lanjut, kandungan Ca yang tinggi diyakini ikut berperan serta dalam mempercepat laju reaksi sehingga meningkatkan kuat tekan pada mortar geopolimer.

Gambar 5c. menunjukkan hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer pada 12 molaritas dengan variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 3. di dapat kuat tekan optimum pada 12 molaritas dengan perolehan kuat tekan sebesar 44,16 MPa, sedangkan pada variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 3,0 di peroleh kuat tekan sebesar 39,66 MPa yang merupakan kuat tekan minimum pada 12 molaritas. Dengan demikian dapat kita simpulkan bahwa semakin tingginya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ meningkat pula kandungan Na_2SiO_3 pada larutan alkalin yang mana berpengaruh terhadap peningkatan ikatan gel Si-O-Si dan Si-O-Al dalam ikatan kimia geopolimer. Lebih lanjut, kandungan Ca yang tinggi juga ikutan didalam mempercepat laju reaksi sehingga meningkatkan kuat tekan pada mortar geopolimer.

Berdasarkan data kuat tekan yang diperoleh dari rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 8M, 10M dan 12M, kuat tekan optimum terjadi pada penggunaan larutan NaOH 10M dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5 sebesar 52,23 MPa, sedangkan kuat tekan minimum pada penggunaan larutan NaOH 10M dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,0 sebesar 31,96 MPa.

IV. KESIMPULAN

Fly ash yang berasal dari PLTU Pangkalan Susu merupakan limbah dari pembakaran batu bara yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik pada PLTU. Berdasarkan hasil dari penelitian, *fly ash* PLTU Pangkalan Susu tergolong kepada *fly ash* tipe C dengan kandungan 34,81% SiO_2 , 25,39% CaO, 14,92% Al_2O_3 , 16,49% Fe_2O_3 dan 4,92% MgO serta total senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 adalah 66,22%. Peningkatan molaritas NaOH yang lebih tinggi akan menyebabkan peningkatan diameter aliran campuran mortar segar sehingga sangat berpengaruh terhadap *workability* mortar geopolimer.

Setting time yang terjadi pada geopolimer berbahan FAPS rata-rata kurang dari 1 jam (*short setting time*) yang mana *initial setting time* lebih tinggi dibandingkan dengan waktu *final setting time*. Tingginya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ akan meningkatkan jumlah kandungan Na_2SiO_3 pada larutan alkalin yang berkontribusi terhadap peningkatan nilai kuat tekan geopolimer yang terjadi. Kuat tekan optimum sebesar 52,23 MPa pada

penggunaan molaritas NaOH sebesar 10M dengan rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2,5.

Kesimpulan dari penelitian ini adalah penggunaan FAPS pada material geopolimer mempengaruhi terhadap kuat tekan mortar geopolimer.

DAFTAR PUSTAKA

- Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8(3), 335–350.
- Davidovits, J. (2018). Why Alkali-Activated Materials are NOT Geopolymers? *Geopolymer Institute*.
- Duxson, P., Jimenez, A. F., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Deventer, J. S. J. van. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42, 2917–2933.
- EFNARC. (2002). *Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete*.
- Fan, F. (2015). *Mechanical and Thermal Properties of Fly Ash-based Geopolymer Cement*.
- Fareed Ahmed, M., Fadhil Nuruddin, M., & Shafiq, N. (2011). Compressive Strength and Workability Characteristics of Low-Calcium Fly ash-based Self-Compacting Geopolymer Concrete. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 5(2), 8–14.
- Fauzi, A. (2018). *Investigation of Sidoarjo Mud as an Addition in Fly Ash Based Geopolymer Concrete*.
- Fauzi Amir., Fazliah., Herri Mahyar., Mulizar., Syukri. (2019). "Penerapan Teknologi Geopolimer Berbasis Limbah Fly Ash Dalam Konstruksi Non Struktural".
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Sobrados, I., & Sanz, J. (2006). The Role Played by The Reactive Alumina Content in The Alkaline Activation of Fly Ashes. *Microporous and Mesoporous Materials*, 91, 111–119.
- Hardjito, D., et. all. 2012. "Pozzolanic Activity Assessment of LUSI (Lumpur Sidoarjo) Mud in Semi High Volume Pozzolanic Mortar". *Materials*. 5(9): p. 1645-1660.
- Hu, M., X. Zhu, and F. Long. 2009. "Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives". *Cement and Concrete Composites*. 31(10): p. 762-768.
- Ivan, E., Diaz-Loya, Allouche, E. N., and Vaidya, S. 2011 "Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," *ACI materials journal*, vol. 108.
- Jaarsveld, J. G. S. Van, Deventer, J. S. J. Van, & Lukey, G. C. (2003). The Characterization of Source Materials in Fly Ash-Based Geopolymers. *Materials Letters*, 57(1), 1272–1280.
- Khater, H. M. (2012). Effect of Calcium on Geopolymerization of Aluminosilicate Wastes. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 92–101.
- Khoiriyah, N. L., & Maisytoh, P. (2016). Karakteristik Mortar Geopolimer Perawatan pada Berbagai Variasi Waktu Curing. *POLITEKNOLOGI*, 15(1).
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2008). *Design and Control of Concrete Mixtures*.
- Muna, Nailul. 2020. "Studi Kelayakan Teknologi Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Nagan Raya Dengan Mengacu Kepada Mortar Konvensional Dengan FAS (faktor air semen) 0,5. Skripsi. Lhokseumawe: Politeknik Negeri Lhokseumawe.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, 66, 163–171.
- Nuruddin, M. F., Malkawi, A. B., Fauzi, A., Mohammed, B. S., & Almatrneh, H. M. (2016). Evolution of geopolymer binders: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 133(1), 1–8.
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2012). Properties of fly ash geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Materials and Design*, 36, 191–198.
- Ramadhaniati, Lia. 2020. "Pengaruh Molaritas Rendah Larutan NaOH Terhadap CaCO₃ Pada Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Nagan Raya. Skripsi. Lhokseumawe: Politeknik Negeri Lhokseumawe.
- Rattanasak, U., Pankhet, K., and Chindaprasirt, P. 2011. "Effect of chemical admixtures on properties of high-calcium fly ash geopolymer," *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. vol. 18, p. 364.
- Riahi, S., et. all. 2012. "Compressive strength of ash-based geopolymers at early ages designed by Taguchi method". *Materials & Design*. 37(0): p. 443-449.
- Shi, C., Roy, D., and Krivenko, P. 2006. "Alkali-Activated Cements and Concretes". *Taylor & Francis*.
- Suraneni, P., Puligilla, S., Kim, E. H., Chen, X., Struble, L. J., and Mondal, P. 2014. "Monitoring setting of geopolymers," *Advances in Civil Engineering Materials*, vol. 3, pp. 177-192.
- Winnefeld, F., et al. 2010. "Assessment of phase formation in alkali activated low and high calcium fly ashes in building materials". *Construction and Building Materials*. 24(6): p. 1086-1093.