

PENGGUNAAN FLY ASH PANGKALAN SUSU TERHADAP IKATAN MIKROSTRUKTUR DAN KARAKTERISTIK PASTA GEOPOLIMER

Iponsyah Putra¹, Cut Nurmala Hajani², Amir Fauzi³, Herri Mahyar⁴

¹²³⁴Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Lhokseumawe, email: ipon@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. Penelitian ini menggunakan molaritas NaOH 10 M dengan rasio larutan alkali terhadap fly ash Pangkalan Susu sebesar 0,4 dan rasio Na₂SiO₃/NaOH sebesar 2,0, 2,5, 3,0 dan 3,5. Adapun tujuan dari penelitian ini yaitu untuk menganalisa kelayakan material fly ash Pangkalan Susu sebagai material dasar pasta geopolimer, serta memanfaatkan limbah fly ash, yang akan dijadikan sebagai bahan dasar pengganti semen pada konstruksi beton. Hasil investigasi menunjukkan bahwa fly ash Pangkalan Susu memiliki kandungan kimia yang kaya akan silika (34.81%), alumina (14.92%), dan kalsium (25.39%). Pasta geopolimer berbahan dasar fly ash Pangkalan Susu diketahui memiliki sifat amorf dengan reaktivitas tinggi. Penurunan berat pasta geopolimer berbahan dasar fly ash Pangkalan Susu sebesar 16% pada suhu pembakaran 6000C. Pasta geopolimer berbahan dasar fly ash Pangkalan Susu memiliki ikatan gel Si-O-Si dan Si-O-Al. Pasta geopolimer berbahan dasar fly ash Pangkalan Susu diketahui memiliki kepadatan gel, concavity, dan fly ash yang tidak bereaksi dalam concavity. Pasta geopolimer berbahan dasar fly ash Pangkalan Susu tidak stabil pada suhu pembakaran 3650C sampai 4200C.

Kata Kunci: XRF, XRD, TGA, FTIR, SEM.

DOI: <https://doi.org/10.30811/bissotek.v12i2.3073>

© Politeknik Negeri Lhokseumawe. All rights reserved

PENDAHULUAN

Penggunaan limbah industri yang memiliki kandungan silika dan kalsium diketahui mampu menggantikan sebagian dari pada penggunaan semen. Lebih lanjut, sebagian limbah industri diketahui juga memiliki kandungan alumina yang tinggi selain kandungan silika dan kandungan kalsium. Sehingga sebagian limbah tersebut diperkirakan mampu menggantikan penggunaan semen dalam industri beton. Teknologi ini dikenal dengan istilah teknologi geopolimer atau *Green Technology* yang diketahui memiliki rekam jejak pelepasan CO₂ yang lebih rendah dibandingkan dengan semen. (Ray & WU, 2009).

Geopolimer adalah bentuk pengikat dengan menggabungkan silikat, aluminat atau unit molekul aluminosilikat yang disediakan melalui peleburan material alternatif dengan kandungan silika *amorf* dan alumina serta larutan aktivator berasal dari alkali hidroksida, silikat, karbonat, dan aluminat atau campurannya. Sumber alumino-silikat ditemukan dalam bahan limbah industri seperti abu terbang atau dikenal dengan nama *Fly Ash (FA)*. *Fly ash* adalah limbah yang berasal dari sisa pembakaran batu bara yang tidak terpakai. Material ini mempunyai kadar bahan semen yang tinggi dan mempunyai sifat pozzolanik, yaitu dapat bereaksi dengan kapur bebas yang dilepaskan semen saat proses hidrasi dan membentuk senyawa yang bersifat mengikat pada temperatur normal dengan adanya air. Komposisi dari *fly ash* sebagian besar terdiri dari silika dioksida (SiO₂), aluminium (Al₂O₃), besi (Fe₂O₃) dan kalsium (CaO), serta magnesium, potassium, sodium, titanium, sulfur, dalam jumlah yang kecil (Irlan, 2020).

Selanjutnya, penambahan larutan alkali yang digunakan adalah natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH). Kombinasi larutan ini membantu terjadinya reaksi kimia dengan alumina (Al) dan silika (Si) yang terdapat pada *fly ash* (abu terbang). Larutan Na_2SiO_3 memberikan sifat viskositas (kekentalan), sementara NaOH memberikan sifat fluida dalam campuran geopolimer segar. Larutan alkali menentukan kelayakan *workability* dalam campuran geopolimer segar.

METODOLOGI

Penyelidikan ini akan mengevaluasi karakteristik material dan mikrostruktur pasta dengan menggunakan alat *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray diffraction* (XRD), *Thermo Gravimetri Analyzer* (TGA), *Fourier Transform Infrared* (FTIR), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC). Serta pengujian *rheology* dan sifat mekanis pasta yang terdiri dari pengujian *workability*, *setting time*, dan kuat tekan (Fauzi et al., 2020).

Material yang digunakan untuk membuat pasta geopolimer adalah material yang berasal dari limbah pembakaran batu bara (*fly ash*) yang dijadikan sebagai alternatif pengganti semen pada pasta geopolimer. Sedangkan material lainnya merupakan 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 *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini adalah *fly ash* yang berasal dari PLTU Pangkalan Susu, Langkat, Sumatera Utara.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Karakteristik Material dan Mikrostruktur Pasta

1. Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF)

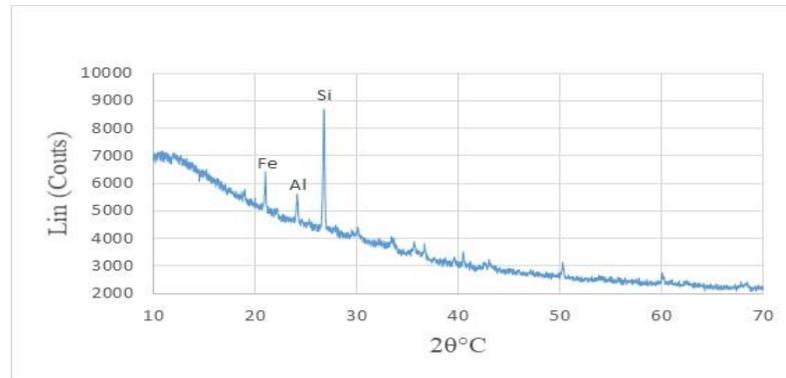
Tabel 1 Persentase Komposisi Kimia dari *Fly Ash* Pangkalan Susu

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

Analisis komposisi kimia diselidiki dengan *X-Ray fluorescence* (XRF). Dari Tabel 1 diatas menunjukkan *Fly Ash* Pangkalan Susu (FAPS) mengandung Si, Al dan Ca yaitu masing-masing 34,81%, 14,92% dan 25,39%. Kandungan kimia ini berperan membentuk gel geopolimerisasi. Senyawa Si dan Al dikategorikan dalam senyawa kaya yang menghasilkan gel kuat Si-O-Si dan Si-O-Al dalam pasta (Andreas dkk., 2018).

2. Pengujian *X-Ray Diffraction*

Identifikasi kristal pasta *fly ash* pangkalan susu diselidiki oleh analisis XRD seperti yang terlihat pada Gambar 1 berikut.

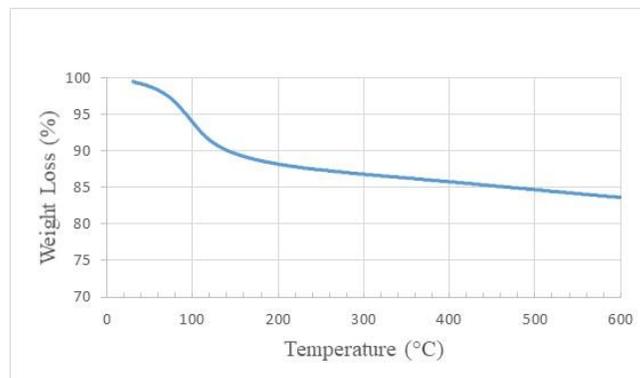


Gambar 1 Pola XRD Dalam Bentuk Pasta Pada *Fly Ash* Pangkalan Susu

Gambar 1 menunjukkan puncak utama dari pasta *fly ash* Pangkalan Susu yang berada pada daerah 20 sampai 30 2θ ($^{\circ}\text{C}$) tepatnya pada daerah 26 sampai 28 2θ ($^{\circ}\text{C}$). 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). Ini sesuai dengan hasil yang diperoleh pada pengujian XRF yang menunjukkan bahwa material FAPS kaya akan kandungan utama Si, sedangkan kandungan Fe dan Al tersedia dalam jumlah yang cukup. 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 geopolymer (Fauzi et al., 2021).

3. Pengujian *Thermo Gravimetric Analyzer*

Gambar 2 menunjukkan penurunan berat pasta *fly ash* Pangkalan Susu yang terjadi diakibatkan oleh proses kalsinasi dalam suhu yang tinggi. Penurunan berat pasta *fly ash* Pangkalan Susu sebesar 0,56% terjadi pada suhu kalsinasi 30 $^{\circ}\text{C}$ hingga 100 $^{\circ}\text{C}$ yang mengindikasikan kondisi penguapan ikatan air atau larutan alkali secara fisik.



Gambar 2 Penurunan Berat Sampel Pasta Geopolimer

Selanjutnya, penurunan berat sebesar 0,71% terjadi pada suhu 100 $^{\circ}\text{C}$ hingga 300 $^{\circ}\text{C}$ yang mengindikasikan terjadinya kondisi penguapan ikatan air secara kimia. Sedangkan, penurunan berat sebesar 0,32% terjadi pada suhu di atas 300 $^{\circ}\text{C}$ mengindikasikan terjadinya kondisi dihidroksilasi gugus OH yang terjadi dengan polikondensasi yang selanjutnya menjadi ikatan siloxo Si-O-Si dengan menghubungkan jaringan rantai geopolymer (Ridha dkk., 2020). Penurunan

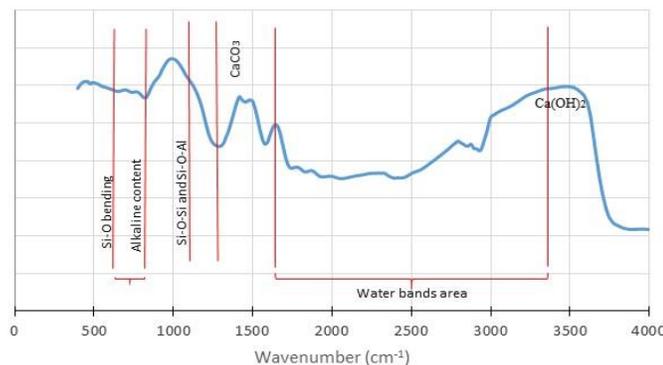
berat yang terjadi di semua titik menunjukkan penurunan berat pasta *fly ash* Pangkalan Susu. Hal ini dikaitkan dengan banyaknya larutan alkali dalam pasta yang menyebabkan lebih banyak penguapan larutan alkali.

4. Pengujian *Fourier Transform Infrared*

Identifikasi ikatan kimia pada partikel *fly ash* ditunjukkan pada gambar 3 dengan mendeskripsikan puncak pita pada daerah gelombang di atas 3440 cm^{-1} menunjukkan keberadaan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ di pasta. Hal ini mengindikasikan material *fly ash* Pangkalan Susu kaya akan kandungan Ca pada material dimana kandungan tersebut bereaksi dengan air yang terkandung dalam larutan alkali membentuk senyawa kimia $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Muna & Fauzi, 2020). Senyawa ini diyakini akan bereaksi dengan senyawa CO_2 membentuk karbonasi (CaCO_3) pada pasta geopolimer.

Puncak pita di daerah gelombang $1630\text{ cm}^{-1} - 3440\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan peregangan dan pembengkokan ikatan H_2O . Dari gambar terlihat bahwa pasta *fly ash* Pangkalan Susu memiliki puncak sebanyak 5 buah yang mengindikasikan jumlah kandungan air yang terdapat dalam pasta *fly ash* Pangkalan Susu. Kandungan air ini berasal dari penggunaan larutan basa pada campuran pasta geopolimer yang menggunakan *fly ash* Pangkalan Susu.

Puncak pita di daerah gelombang $1380\text{ cm}^{-1} - 1450\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan peregangan CaCO_3 (kalsium karbonat) yang terdapat pada pasta *fly ash* Pangkalan Susu. Peregangan CaCO_3 yang terjadi pada pasta geopolimer memiliki keterkaitan dengan puncak pita dengan gelombang 3440 cm^{-1} . Hal ini disebabkan oleh reaksi CO_2 terhadap $\text{Ca}(\text{OH})_2$ selama proses reaksi geopolimer terjadi.



Gambar 3 Identifikasi Bentuk Ikatan Kimia Pasta *Fly Ash* Pangkalan Susu

Puncak pita di daerah bilangan gelombang $880\text{ cm}^{-1} - 1140\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan peregangan dalam pasta yang menunjukkan bahwa material *fly ash* Pangkalan Susu mampu bereaksi dengan larutan alkali untuk membentuk gel Si-O-Si dan Si-O-Al yang berfungsi sebagai pengikat dan berkontribusi terhadap kuat tekan pada mortar geopolimer (Aiyub, 2022). Jumlah puncak pita pasta geopolimer pada gelombang ini sebanyak 1 buah yang mengindikasikan bahwa *fly ash* Pangkalan Susu memiliki potensi untuk dijadikan sebagai material dasar pada geopolimer.

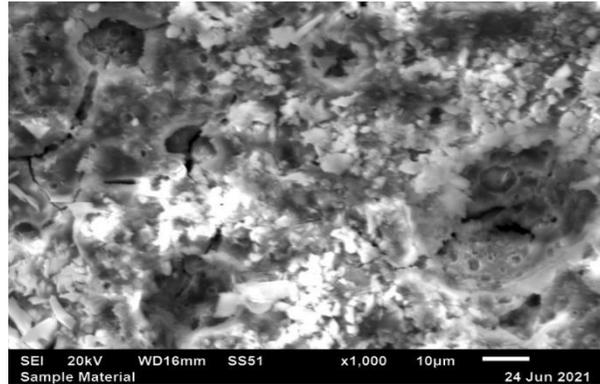
Puncak pita di daerah gelombang $680\text{ cm}^{-1} - 800\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya kandungan alkali pada pasta geopolimer. Diketahui bahwa jumlah puncak pita pada pasta geopolimer sebanyak 2 buah. Hal ini dikaitkan dengan permukaan partikel *fly ash* Pangkalan Susu yang memiliki permukaan seperti kaca yang menyerap larutan alkali dan meninggalkan kandungan alkali pada permukaan pasta geopolimer.

Puncak pita pada daerah bilangan gelombang di bawah 680 cm^{-1} menunjukkan pembengkokan Si-O. Seperti terlihat pada gambar, puncak pita pada pasta geopolimer sebanyak 2

buah. Hal ini disebabkan oleh besarnya jumlah kandungan Si dalam material *fly ash* Pangkalan Susu dimana kandungan Si yang tersisa tidak mendapatkan porsi untuk bereaksi dengan kandungan Al.

5. Pengujian *Scanning Electron Microscopy*

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



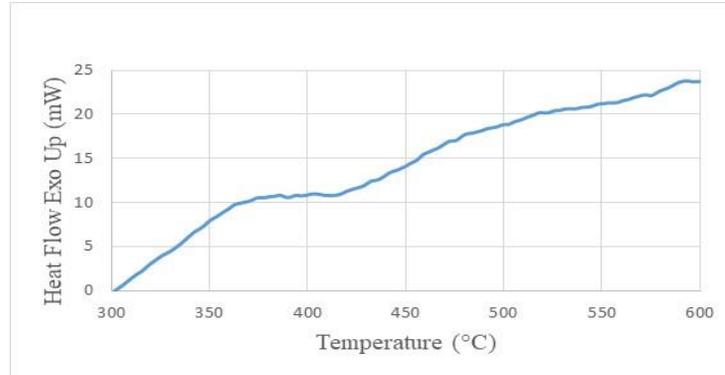
Gambar 4 Permukaan dan Identifikasi Kimia Pasta

Gambar 4 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 mempunyai 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.

6. Pengujian *Differential Scanning Calorimetry* (DSC)

Pengujian DSC dilakukan untuk menganalisa perubahan dari material atau pasta yang diakibatkan oleh kenaikan *thermal* (suhu). Gambar 5 menunjukkan hasil pembacaan DSC terhadap pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* Pangkalan Susu. Hasil menunjukkan bahwa terjadi ketidakstabilan dari pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* Pangkalan Susu pada suhu 365⁰C - 420⁰C. Ini mengindikasikan bahwa *fly ash* Pangkalan Susu mampu menahan suhu pembakaran sampai pada 365⁰C.



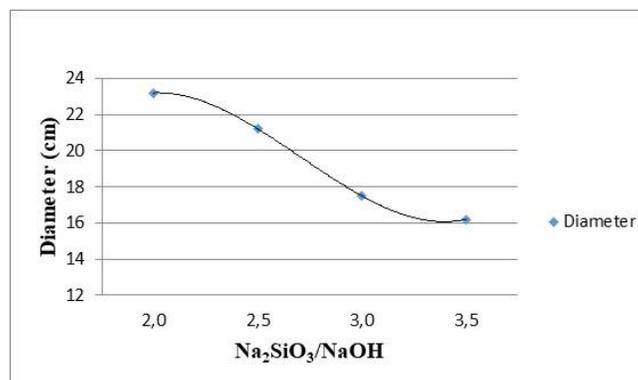
Gambar 5 Pengujian Analisa *Thermal* Pasta *Fly Ash* Pangkalan Susu

B. *Rheology* dan Sifat Mekanis Pasta

1. *Workability*

Workability yang dikaji berupa campuran geopolimer segar yang dipengaruhi oleh permukaan partikel dari material. Permukaan *fly ash* Pangkalan Susu berupa bola licin seperti kaca yang diyakini berkontribusi terhadap lamanya waktu penyerapan larutan alkali oleh material yang digunakan (Qomaruddin, 2019). Namun penggunaan molaritas NaOH dan rasio Na_2SiO_3 terhadap NaOH juga dapat mempengaruhi terjadinya perubahan *workability* pada campuran segar geopolimer. Hal ini dikaitkan dengan pelumasan larutan alkali yang terjadi yang berkontribusi terhadap viskositas (kekentalan) dalam campuran geopolimer segar (Fazliah, 2019).

Larutan alkali diketahui lebih kental dibandingkan dengan air yang berkontribusi terhadap sifat kohesif dan melekat dalam campuran geopolimer segar dibandingkan dengan campuran konvensional. Viskositas larutan alkali dihasilkan dengan konsentrasi larutan NaOH dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$. Larutan NaOH dengan konsentrasi tinggi memberikan laju disolusi tinggi yang meningkatkan viskositas larutan basa (Fauzi et al., 2021). Sedangkan, rasio tinggi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ berkontribusi terhadap sifat viskos yang lebih segar pada campuran segar geopolimer. Sehingga, kedua parameter ini menyebabkan pengurangan *workability* pada campuran segar geopolimer yang diilustrasikan seperti terlihat pada Gambar 6.



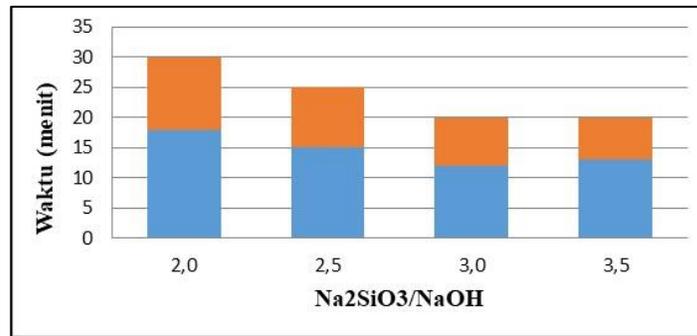
Gambar 6 *Workability* Geopolimer Pasta Molaritas 10 dengan LA/FA = 0,4

Gambar 6 menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio larutan Na_2SiO_3 terhadap NaOH semakin rendah *workability* yang terjadi. Hal ini dikaitkan dengan semakin kentalnya campuran segar geopolimer yang terbentuk dari tingginya penggunaan rasio larutan Na_2SiO_3 terhadap larutan NaOH pada larutan alkali (Dony & Das, 2019). Gambar 6 menunjukkan bahwa kenaikan rasio

larutan Na_2SiO_3 terhadap larutan NaOH dari 2,0 sampai 3,5 menyebabkan penurunan diameter aliran *flow table* sebesar 7 mm (40%).

2. *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, elastis dan statis (Putri et al., 2019). *Setting time* yang terjadi pada geopolimer tergantung pada kandungan Ca dari material dan larutan basa dalam campuran geopolimer segar. Diketahui bahwa konsentrasi larutan NaOH dan rasio larutan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ yang tinggi menyebabkan penurunan *setting time* pada geopolimer. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi pada larutan NaOH dan material *fly ash* Pangkalan Susu menyebabkan peningkatan laju reaksi geopolimer yang berpengaruh terhadap percepatan *setting time* pada campuran segar geopolimer. Selain itu, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ yang tinggi menyebabkan campuran segar geopolimer lebih kental sehingga akan menjadi lebih kaku dan akan mengeras dalam waktu yang singkat (Fauzi et al., 2021).

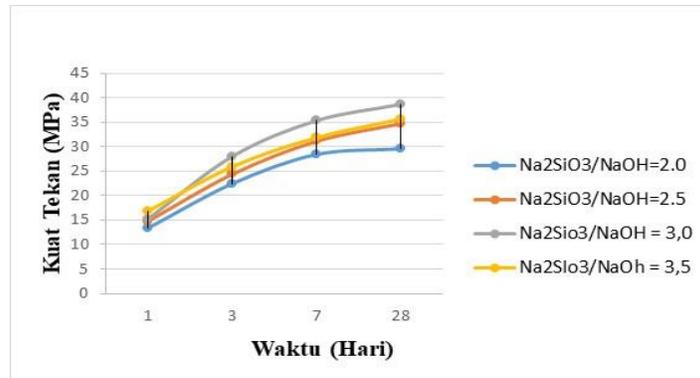


Gambar 7 *Setting Time* Pasta Geopolimer Molaritas 10 LA/FA = 0,4

Gambar 7 menunjukkan rata-rata waktu *initial setting time* lebih tinggi di bandingkan dengan waktu *final setting time*. Ini dikaitkan dengan reaksi yang terjadi pada akhir lebih cepat dibandingkan dengan reaksi yang terjadi di awal. Selain itu, kandungan kalsium (Ca) yang tinggi pada *fly ash* Pangkalan Susu juga menyebabkan terjadinya percepatan reaksi yang terjadi pada campuran segar geopolimer (Satria et al., 2016). Lebih lanjut, peningkatan rasio larutan Na_2SiO_3 terhadap larutan NaOH menyebabkan penurunan *final setting time*. Hal ini memiliki kesesuaian dengan hasil yang diperoleh dalam analisa *workability* yang menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio Na_2SiO_3 terhadap NaOH pada larutan alkalin maka campuran segar geopolimer semakin kental dan *setting time* akan terjadi lebih cepat (Ningtyas, 2010).

3. Kuat Tekan

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



Gambar 8 Hasil Pengujian Kuat Tekan Pasta Geopolimer

Gambar 8 menunjukkan hasil pengujian kuat tekan pasta geopolimer berbahan dasar *fly ash* Pangkalan Susu pada molaritas 10 dengan rasio larutan alkali terhadap *fly ash* Pangkalan Susu sebesar 0,4 dan rasio larutan Na₂SiO₃/NaOH berturut-turut sebesar 2,0, 2,5, 3,0, dan 3,5. Hasil menunjukkan kuat tekan optimum sebesar 38.70 MPa terjadi pada rasio Na₂SiO₃/NaOH 3.0 dan kuat tekan minimum sebesar 29.50 MPa terjadi pada rasio Na₂SiO₃/NaOH 2.0. Hal ini dikaitkan dengan makin tingginya rasio Na₂SiO₃/NaOH menyebabkan terjadinya peningkatan jumlah Na₂SiO₃ yang digunakan dalam larutan alkali yang berkontribusi terhadap penambahan ikatan gel Si-O-Si dan Si-O-Al dalam ikatan kimia geopolimer (Muna & Fauzi, 2020). Lebih lanjut, kandungan Ca yang tinggi yang dapat mempercepat laju reaksi diyakini juga membantu peningkatan kuat tekan pada pasta geopolimer khususnya pada kuat tekan di usia awal.

KESIMPULAN

Fly ash Pangkalan Susu memiliki kandungan kimia yang kaya akan silika (34.81%), alumina (14.92%), dan kalsium (25.39%). Kandungan kimia ini diyakini akan membentuk ikatan gel Si-O-Si, Si-O-Al, dan C-A-S-H. Semakin tinggi penggunaan rasio Na₂SiO₃ terhadap NaOH pada 10 molaritas NaOH menyebabkan penurunan *workability* dan *setting time* pada campuran segar pasta geopolimer. Kuat tekan maksimum sebesar 38.70 MPa terjadi pada rasio Na₂SiO₃/NaOH 3.0 dan kuat tekan minimum sebesar 29.50 MPa terjadi pada rasio Na₂SiO₃/NaOH 2.0.

DAFTAR PUSTAKA

- Aiyub, A. (2022). Perbandingan Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Nagan Raya Terhadap Mortar Konvensional Dengan FAS 0, 5. *Jurnal Teknik Sipil Unaya*, 8(2), 171–180.
- Andreas, Willy, P., Anik, K. R. (2018). Perencanaan Dan Pengendalian Material Pada Proyek Konstruksi Palu Grand Mall. *Jurnal teknik sipil Unaya*. 4(2), 40–50. <http://jurnal.untad.ac.id/jurnal/index.php/JTSl/article/viewFile/2410/1571>
- Dony, W., & Das, A. M. (2019). Studi Mikrostruktur mortar geopolimer abu sawit dengan variasi rasio na₂SiO₃ Terhadap NaOH. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 19(1), 132–138.
- Fauzi, A., Fazliah, F., Mahyar, H., Syukri, S. (2020). Analisa Karakteristik Mekanik Mortar Geopolimer dengan Mengacu kepada Karakteristik Mekanik Mortar Konvensional. *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 4(1), 31–35. <http://e->

- jurnal.pnl.ac.id/semnaspnl/article/view/2658
<http://e-jurnal.pnl.ac.id/semnaspnl/article/viewFile/2658/2208>
- Fauzi, A., Keliat, A. M., Majuar, E., Hajani, C. N., Mahyar, H., & Fahmi, M. (2021). *Kuat Tekan Mortar Geopolimer*. 5(1), 71–76.
- Fauzi, A., Keliat, A. M., Majuar, E., Hajani, C. N., Syukri, S., Mahyar, H., Iskandar, I., & Fahmi, M. (2021). Pengaruh Penggunaan Fly Ash Pltu Pangkalan Susu Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer. *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 5(1), 71–76.
- Fazliah, F. (2019). Penerapan Teknologi Geopolimer Berbasis Limbah Fly Ash Dalam Konstruksi Non Struktural. *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 3(1), 32.
- Irlan, A. O. (2020). Tinjauan Karakteristik Bahan Penyusun Beton Berpori dengan Penggunaan Flyash dan Superplasticizer untuk Perkerasan Jalan Ramah Lingkungan. *Kilat*, 9(2), 244–256. <https://stt-pln.e-journal.id/kilat/article/view/954>.
- Muna, N., & Fauzi, A. (2020). Perbandingan Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Nagan Raya Terhadap Mortar Konvensional Dengan Fas 0, 5. *Jurnal Sipil Sains Terapan*, 3(02).
- Ningtyas, E. (2010). *Pengaruh Molaritas Naoh dan Modulus Alkali (Na₂O/Sio₂) Terhadap Setting Time Fly Ash-Based Geopolymer*.
- Putri, K. Y., Iskandar, I., Ruhana, R., Miswar, M., & Fauzi, A. (2019). Pengaruh penggunaan lumpur Sidoarjo sebagai substitusi material fly ash pada geopolimer. *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 3(1), 134.
- Qomaruddin, M. (2019). *Teknologi Bahan Konstruksi*. UNISNU PRESS.
- Ray, N., & WU, J. (2009). *Alternatif Penggunaan Limbah Pabrik Kertas Sebagai Pengganti Sebagian Semen (Cementitious) dalam Pembuatan Beton*.
- Ridha, R., Syarwan, & Supardin. (2020). Jurnal sipil sains terapan 1. *Jurnal Sipil Sains Terapan*, 03(2), 1–75.
- Satria, J., Sugiarto, A., Antoni, A., & Hardjito, D. (2016). Karakteristik Beton Geopolimer Berdasarkan Variasi Waktu Pengambilan Fly Ash. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 5(1).