

ANALISIS PENGARUH VARIASI RASIO MASSA ALKALI AKTIVATOR/*FLY ASH* DAN RASIO MASSA $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH* DARI WILAYAH SUMATERA SELATAN

Hadi Winata^{1*}, Bimo B. Adhitya² dan Budi Nayobi³

¹Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: 03011282126054@student.unsri.ac.id

ABSTRAK: Mortar geopolimer merupakan inovasi material ramah lingkungan yang berpotensi menggantikan mortar konvensional karena tidak menggunakan semen sebagai bahan pengikat, melainkan memanfaatkan limbah industri seperti *fly ash*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio massa alkali aktivator/*fly ash* (AA:FA) dan rasio massa natrium silikat/natrium hidroksida ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) terhadap kuat tekan mortar geopolimer yang menggunakan *fly ash* dari dua sumber di Sumatera Selatan, yaitu PT Pupuk Sriwidjaja dan PT Bukit Asam Tbk. Pengujian dilakukan pada umur mortar di 3, 7, dan 28 hari. Selain itu, karakteristik *fly ash* diuji menggunakan metode XRF, XRD, dan SEM untuk mengetahui kandungan kimia, tingkat reaktivitas, dan bentuk partikelnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbandingan rasio AA:FA dan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan mortar. Kuat tekan optimum diperoleh dari kombinasi rasio AA:FA = 0,6 dengan kuat tekan sebesar 47,25 MPa untuk *fly ash* PUSRI dan AA:FA = 1,3 dengan kuat tekans sebesar 7,28 MPa untuk *fly ash* PTBA. Berdasarkan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ didapat nilai optimum di rasio 2,5:1 untuk *fly ash* PTBA dan PUSRI di mana untuk kuat tekannya sebesar 43,28 MPa untuk mortar dengan *fly ash* PUSRI dan 6,02 MPa untuk mortar dengan *fly ash* PTBA.

Kata Kunci: *fly ash*, alkali aktivator, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, kuat tekan mortar

ABSTRACT: Geopolymer mortar is an environmentally friendly material innovation with the potential to replace conventional mortar, as it does not use cement as a binder but instead utilizes industrial waste such as fly ash. This study aims to analyze the effects of varying the mass ratio of alkali activator to fly ash (AA:FA) and the mass ratio of sodium silicate to sodium hydroxide ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) on the compressive strength of geopolymer mortar using fly ash from two sources in South Sumatra: PT Pupuk Sriwidjaja (PUSRI) and PT Bukit Asam Tbk (PTBA). Compressive strength tests were conducted at 3, 7, and 28 days of curing. Additionally, the characteristics of the fly ash were evaluated using X-ray Fluorescence (XRF), X-ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscopy (SEM) to determine its chemical composition, reactivity, and particle morphology. The results indicate that both the AA:FA and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios significantly affect the compressive strength of the mortar. The optimum compressive strength was achieved at an AA:FA ratio of 0.6, resulting in 47.25 MPa for fly ash from PUSRI, and at an AA:FA ratio of 1.3 with 7.28 MPa for fly ash from PTBA. Regarding the $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio, the optimal value was found at 2.5:1 for both fly ash sources, producing a compressive strength of 43.28 MPa for mortar with PUSRI fly ash and 6.02 MPa for mortar with PTBA fly ash.

Keywords: *fly ash*, alkali aktivator, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, compressive strength

1 PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring dengan upaya negara untuk menjadi negara maju. Industri semen memegang peran penting dalam mendukung pembangunan ini. Namun, proses produksi semen masih sangat bergantung pada batu bara sebagai bahan bakar, yang merupakan sumber daya tak terbarukan dan berdampak buruk terhadap lingkungan. Proses ini menghasilkan limbah B3, debu, serta emisi karbon dioksida (CO_2) yang berkontribusi

signifikan terhadap pemanasan global [1]. Emisi CO_2 dari industri semen bahkan mencapai sekitar 7% dari total emisi gas rumah kaca global dan diperkirakan dapat meningkatkan suhu bumi hingga 5,8°C dalam 100 tahun ke depan [2].

Salah satu alternatif solusi yang tengah dikembangkan adalah mortar geopolimer. Mortar ini dibuat tanpa menggunakan semen sebagai bahan pengikat, melainkan memanfaatkan limbah industri yang mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), seperti

kaolin, abu sekam padi, dan *fly ash*. Material-material tersebut dicampur dengan *alkali activator* seperti natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3) untuk membentuk struktur geopolimer [3].

Fly ash merupakan salah satu bahan utama dalam *mortar geopolimer*. Limbah ini dihasilkan dari pembakaran batu bara dan mengandung partikel halus yang berbahaya jika terhirup oleh manusia serta dapat mencemari air tanah apabila tidak dikelola dengan baik [1]. Permintaan batu bara di Indonesia pada tahun 2019 mencapai 97 juta ton untuk memenuhi kebutuhan energi nasional, terutama dari sektor kelistrikan yang masih bergantung pada PLTU serta industri seperti pulp, kertas, dan kimia [4]. Di sisi lain, tingkat pemanfaatan *fly ash* di Indonesia masih tergolong rendah, yaitu hanya sekitar 10–12% dari total limbah yang dihasilkan [5]. Oleh karena itu, penggunaan *fly ash* sebagai bahan baku *mortar geopolimer* merupakan langkah strategis untuk mengurangi limbah sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan.

Komposisi kimia dalam *fly ash*, khususnya senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 , sangat memengaruhi karakteristik *mortar geopolimer*. SiO_2 diperlukan untuk pembentukan oligomer dan proses polikondensasi silikat yang efektif, sedangkan Al_2O_3 memengaruhi stabilitas dan ketahanan material [6]. Kandungan Fe_2O_3 juga memiliki peran penting; dalam larutan basa, unsur ini membentuk senyawa $\text{Fe}(\text{OH})_3$ yang dapat mengurangi jumlah ion hidroksida yang dibutuhkan untuk melarutkan silika dan alumina, sehingga dapat menghambat proses geopolimerisasi [6]. Oleh karena itu, diperlukan komposisi senyawa yang tepat dalam *fly ash* agar diperoleh *mortar geopolimer* dengan kuat tekan optimal.

2 METODE

Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan pendekatan kuantitatif. *Fly ash* yang digunakan berasal dari dua sumber, yaitu PT. Pupuk Sriwidjaja (PUSRI) dan PT. Bukit Asam Tbk (PTBA). Tahapan penelitian diawali dengan studi literatur dan pengumpulan bahan, kemudian dilanjutkan dengan karakterisasi *fly ash* menggunakan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*) untuk mengetahui komposisi kimia, XRD (*X-Ray Diffraction*) untuk menentukan tingkat kristalinitas, dan SEM (*Scanning Electron Microscopy*) untuk mengamati morfologi dan ukuran partikel. Campuran mortar geopolimer disiapkan dengan variasi rasio alkali aktivator/*fly ash* (0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8) dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (1; 1,5; 2; 2,5; 3), menggunakan larutan NaOH 15 M. Mortar dicetak, kemudian dilakukan proses curing dalam oven pada suhu 80°C selama 24 jam. Uji kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, dan 28 hari menggunakan mesin uji tekan sesuai standar ASTM dan SNI untuk mengevaluasi performa mekanik mortar geopolimer.

Dalam penyusunan *Job mix Design* (JMD) mortar geopolimer dalam penelitian ini disusun berdasarkan penyesuaian antara proporsi campuran pada Tabel 1 terhadap ukuran benda uji yang digunakan. Penyesuaian ini dilakukan agar jumlah dan susunan bahan material sesuai dengan kebutuhan cetakan kubus 5x5x5 cm, sehingga hasil pengujian kuat tekan dapat menggambarkan kinerja campuran dengan tepat.

Tabel 1. *Job Mix Design* (JMD) untuk benda uji geopolimer variasi rasio masa FA/AA

Sampel	Label	Pasir (Kg)	Binder (FA/AA)		
			Prekursor	Alkali Aktivator	
			Berat <i>Fly Ash</i> (Kg)	Na_2SiO_3 (Kg)	NaOH (Kg)
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	A	0,105	0,700	0,280	
				0,21	0,07
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	B	0,105	0,700	0,350	
				0,26	0,09
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	C	0,105	0,700	0,420	
				0,32	0,11
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	D	0,105	0,700	0,490	
				0,37	0,12
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	E	0,105	0,700	0,560	
				0,42	0,14
<i>Fly ash</i> (PTBA)	F	0,105	0,700	0,700	
				0,53	0,18
<i>Fly ash</i> (PTBA)	G	0,105	0,700	0,770	

				0,58	0,19
<i>Fly ash</i> (PTBA)	H	0,105	0,700	0,840	
				0,63	0,21
<i>Fly ash</i> (PTBA)	I	0,105	0,700	0,910	
				0,68	0,23
<i>Fly ash</i> (PTBA)	J	0,105	0,700	0,980	
				0,74	0,25

Tabel 2. *Job Mix Design (JMD)* untuk benda uji geopolimer variasi rasio masa $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

<i>Fly ash</i> (PUSRI)	A1	0,105	0,700	0,350	
				0,18	0,18
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	B1	0,105	0,700	0,350	
				0,21	0,14
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	C1	0,105	0,700	0,350	
				0,23	0,12
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	D1	0,105	0,700	0,350	
				0,25	0,10
<i>Fly ash</i> (PUSRI)	E1	0,105	0,700	0,350	
				0,26	0,09
<i>Fly ash</i> (PTBA)	F1	0,105	0,700	0,980	
				0,49	0,49
<i>Fly ash</i> (PTBA)	G1	0,105	0,700	0,980	
				0,59	0,39
<i>Fly ash</i> (PTBA)	H1	0,105	0,700	0,980	
				0,65	0,33
<i>Fly ash</i> (PTBA)	I1	0,105	0,700	0,980	
				0,70	0,28
<i>Fly ash</i> (PTBA)	J1	0,105	0,700	0,980	
				0,74	0,25

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

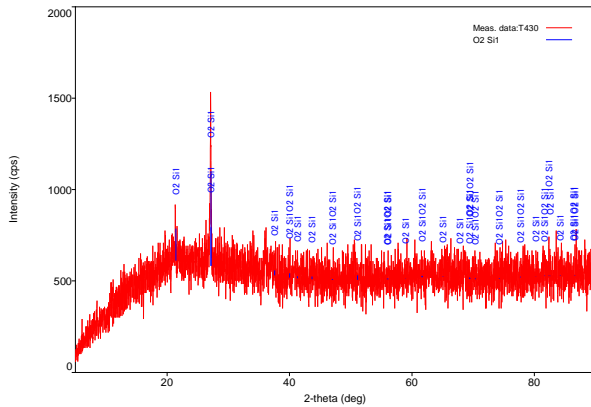
Hasil Pengujian Fly Ash

Pengujian pada *fly ash* terdiri dari tiga jenis, yaitu pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), dan Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)

a. Pengujian *X-Ray Diffraction* (XRD)

Pengujian XRD dilakukan untuk mendeteksi dan mengidentifikasi fase-fase kristal yang ada dalam *fly ash*.

Pola difraktogram dari hasil XRD juga dapat memperkirakan keberhasilan proses pembuatan geopolimer. Metode ini melibatkan penggunaan sinar X-Ray dengan tegangan 40 kV dan arus 10 mA, serta menggerakkan sampel pada kecepatan 10°/menit dengan sudut difraksi sebesar 2θ dalam rentang sudut antara 5 hingga 90 derajat.



Gambar 1. Hasil Pengujian XRD Fly Ash

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

Pengujian *X-Ray Fluorescence* (XRF) dilakukan untuk mengetahui komposisi kimia *fly ash* serta menentukan klasifikasinya sesuai standar ASTM C618-2019, yang mensyaratkan kandungan total SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 minimal 50%, CaO maksimum 18%, dan SO_3 tidak lebih dari 5%. SiO_2 berfungsi sebagai sumber silikat yang bereaksi dengan Al_2O_3 membentuk jaringan tiga dimensi *aluminosilicate*, yang menjadi struktur utama geopolimer. Kehadiran Al_2O_3 mendukung kestabilan termal dan kekuatan material, sementara Fe_2O_3 turut memperkuat ikatan dan menambah ketahanan kimia. Kandungan CaO yang berlebihan harus dihindari karena dapat memicu pembentukan senyawa C-S-H seperti pada semen Portland, bukan gel N-A-S-H yang khas pada geopolimer, sehingga dapat mengubah sifat dasar dan stabilitasnya. Kandungan CaO dalam bahan baku geopolimer umumnya dibatasi hingga maksimal sekitar 18%. Pembatasan ini penting karena keberadaan kalsium oksida dalam jumlah yang terlalu tinggi dapat mengubah arah reaksi kimia selama proses geopolimerisasi. Alih-alih membentuk gel **N-A-S-H** (*Natrium-Aluminium-Silikat-Hidrat*) yang merupakan fase pengikat utama dan khas pada sistem geopolimer, kandungan CaO yang berlebih justru cenderung menghasilkan **C-S-H** (*Calcium Silicate Hydrate*), yaitu produk hidrat yang umumnya terbentuk pada reaksi hidrasi semen Portland konvensional. Perubahan ini dapat menurunkan kemurnian sistem geopolimer, mengganggu pembentukan struktur tiga dimensi khususnya, serta mengurangi kestabilan kimia dan ketahanan jangka panjang dari material yang dihasilkan. Selain itu, kandungan SO_3 juga perlu dibatasi untuk mencegah keretakan dan penurunan daya tahan material [7].

Hasil pengujian XRD menunjukkan bahwa puncak-puncak tajam dan tinggi mencerminkan keberadaan fasa kristalin yang bersifat tidak reaktif, sedangkan keberadaan *hump* pada rentang $2\theta = 20\text{--}40^\circ$ menandakan fasa amorf yang berperan penting dalam proses geopolimerisasi karena hanya silika dan alumina dalam fasa amorf yang dapat larut dan bereaksi dalam larutan alkali. Hasil pengujian XRD pada kedua sampel *fly ash* baik dari PT Pusri maupun PT Bukit Asam (PTBA) menunjukkan bahwa fasa kristalin dominan adalah SiO_2 , dengan *fly ash* Pusri memiliki jumlah fasa kristalin lebih sedikit namun intensitas puncaknya sedikit lebih tinggi (± 1500 cps) dibandingkan dengan *fly ash* PTBA (± 1450 cps) [6].

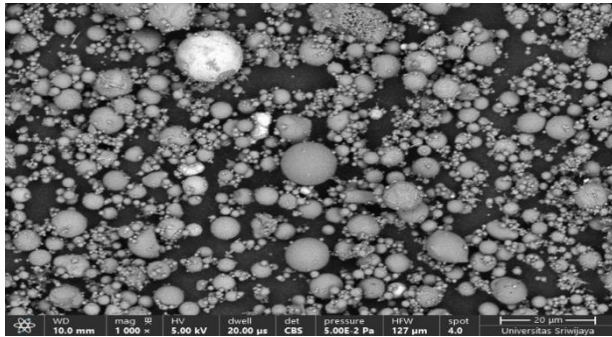
Tabel 3 Hasil Pengujian XRF Fly Ash PUSRI

Komposisi Kimia	Jumlah (%)
SiO_2	50.513
Al_2O_3	22.944
Fe_2O_3	11.298
CaO	4.927
Na_2O	4.472
MgO	1.853
SO_3	1.526
K_2O	1.369
TiO_2	0.837
P_2O_5	0.174
Mn_3O_4	0.070

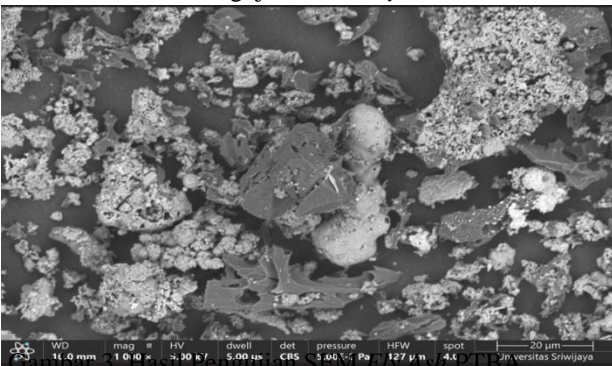
Tabel 4 Hasil Pengujian XRF Fly Ash PTBA

Komposisi Kimia	Jumlah (%)
SiO_2	$54,634 \pm 0,157\%$
Al_2O_3	$23,819 \pm 0,136\%$
Fe_2O_3	$7,968 \pm 0,028\%$
CaO	$5,160 \pm 0,027\%$
Na_2O	$1,304 \pm 0,254\%$
MgO	$1,859 \pm 0,088\%$
SO_3	$2,666 \pm 0,028\%$
K_2O	$1,095 \pm 0,021\%$
TiO_2	$1,011 \pm 0,012\%$
P_2O_5	$0,380 \pm 0,023\%$
Mn_3O_4	$0,104 \pm 0,004\%$

c. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)
 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) bermaksud menampilkan struktur butiran *fly ash*. Distribusi ukuran partikel abu terbang memiliki peran penting dalam menentukan sifat mekanik geopolimer. Secara umum, abu terbang memiliki morfologi berbentuk bulat dengan ukuran partikel yang diperkirakan berkisar antara 1-100 μm . [6].



Gambar 2. Hasil Pengujian SEM *Fly Ash* PUSRI



Gambar 3. Hasil Pengujian SEM *Fly Ash* PTBA

Bentuk butiran *fly ash* yang cenderung bulat dan tingkat keamorfannya yang tinggi membuatnya lebih reaktif, sehingga mampu meningkatkan kuat tekan beton melalui reaksi pozzolanic [8]. Hasil pengamatan mikroskopis menunjukkan bahwa *fly ash* PUSRI memiliki ukuran partikel yang lebih kecil ($\leq 20 \mu\text{m}$) dan lebih seragam dibandingkan *fly ash* PTBA yang cenderung lebih besar ($\geq 20 \mu\text{m}$) dan tidak seragam. Bentuk partikel yang sferis serta ukurannya yang relatif kecil menyebabkan material ini memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi. Luas permukaan yang besar tersebut memungkinkan lebih banyak bagian dari silika dan alumina yang dapat berinteraksi secara langsung dengan larutan alkali. Akibatnya, proses pelarutan dan reaksi kimia antara komponen-komponen tersebut berlangsung lebih efektif dan cepat. Hal ini pada akhirnya meningkatkan tingkat reaktivitas silika dan alumina selama proses geopolimerisasi, yang berperan penting dalam pembentukan struktur geopolimer yang kuat dan stabil. Ukuran partikel yang lebih halus akan meningkatkan reaktivitas serta *workability* dari campuran mortar [6]. Selain itu, *fly ash* PUSRI memiliki jarak antar partikel yang lebih rapat, yang mempermudah pembentukan ikatan pasta dalam struktur geopolimer, berbeda dengan *fly ash* PTBA yang memiliki jarak antar partikel lebih renggang akibat perbedaan diameternya.

Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Berikut merupakan tabel dan grafik hasil dari pengujian kuat tekan beton geopolimer dengan penambahan triethanolamine pada umur beton 3 hari, 7 hari, dan 28 hari:

Tabel 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer PUSRI Variasi AA/ FA

Sampel	AA/FA	Umur (Hari)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
A	0,4	3	18,02
		7	25,82
		28	36,15
B	0,5	3	21,65
		7	27,208
		28	41,84
C	0,6	3	22,63
		7	28,71
		28	47,25
D	0,7	3	12,02
		7	21,97
		28	26,58
E	0,8	3	5,74
		7	11,13
		28	20,3

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer PTBA Variasi AA/ FA

Sampel	AA/FA	Umur (Hari)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
F	1	3	3,304
		7	4,15
		28	4,26
G	1,1	3	2,93
		7	3,61
		28	3,98
H	1,2	3	3,22
		7	5,62
		28	5,84
I	1,3	3	3,22
		7	4,43
		28	7,28
J	1,4	3	2,28
		7	3,66
		28	6,02

Tabel 7. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer PUSRI Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

Sampel	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Umur (Hari)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
A1	1	3	2,31
		7	4,15
		28	5,8
B1	1,5	3	5,25
		7	6,26
		28	16,42
C1	2	3	14,81
		7	18,36
		28	24,96
D1	2,5	3	18,963
		7	25,11
		28	43,48
E1	3	3	21,65
		7	27,208
		28	41,84

Tabel 8. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer PTBA Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$

Sampel	$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Umur (Hari)	Rata-rata Kuat Tekan (MPa)
F1	1	3	0,91
		7	1,11
		28	2,77
G1	1,5	3	0,5
		7	1,58
		28	3,73

H1	2	3	0,81
		7	2,23
		28	4,23
I1	2,5	3	3,31
		7	3,85
		28	6,61
J1	3	3	2,28
		7	3,66
		28	6,02

Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer PUSRI dan PTBA Berdasarkan Variasi AA/FA

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan, perbandingan kuat tekan mortar geopolimer dengan fly ash PUSRI dan fly ash PTBA berdasarkan variasi AA : FA tidak dapat dibandingkan secara langsung berdasarkan data. Hal ini dikarenakan pada saat percobaan pembuatan sampel mortar dilakukan untuk pengujian data JMF dari jurnal terdahulu, campuran mortar dengan fly ash PUSRI mampu dibuat sesuai dengan data JMF dan prosedur yang tertera, namun untuk campuran mortar dengan fly ash PTBA tidak dapat tercampur secara homogen pada saat AA : FA bernilai 0,4-0,8. Pada saat percobaan pencampuran dengan variasi AA : FA 0,4 hingga 0,8 fly ash PTBA sendiri terkesan sangat mendominasi campuran mortar dan tidak dapat bercampur secara homogen dikarenakan



Gambar 4. Campuran Mortar dengan Fly Ash PTBA

Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer PUSRI dan PTBA Berdasarkan Variasi AA/FA

Tugas dari Na_2SiO_3 mempercepat reaksi polimerisasi.

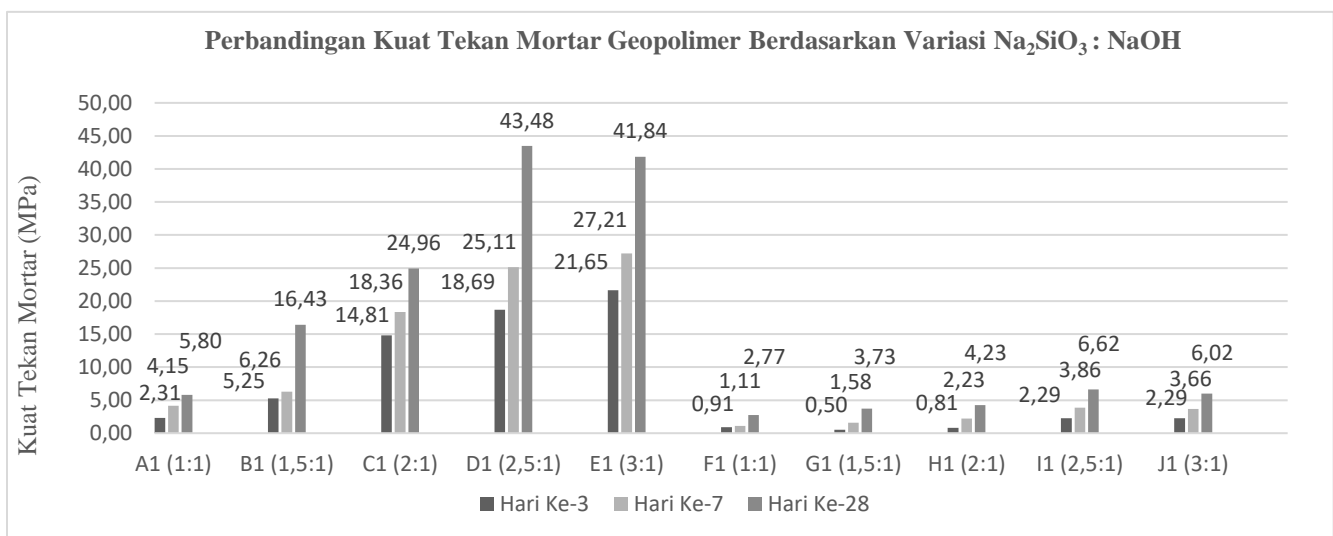
kurangnya alkali aktivator. Campuran terkesan terpecah dan tidak dapat tercampur secara merata. Seperti yang bisa dilihat pada gambar 4, di mana campuran mortar tidak dapat tercampur secara merata. Maka dari itu, peneliti pun mengubah rentang variasi AA : FA untuk campuran mortar dengan fly ash PTBA menjadi 1-1,4. Hal ini dilakukan berdasarkan percobaan yang dilakukan di mana pada saat pengujian dilakukan, pada saat campuran mortar dengan fly ash PTBA menggunakan rasio AA : FA = 1, campuran baru dapat dicampur dengan *workability* rendah dikarenakan sulit pada saat dilakukan proses *mixing* di mana teksturnya campuran tersebut keras dan a lot walaupun pada akhirnya masih mampu untuk membentuk ikatan homogen.

Berdasarkan tabel 5 dan tabel 6, hasil kuat tekan mortar dengan fly ash PUSRI dan mortar dengan fly ash PTBA memiliki kesenjangan yang cukup jauh di mana berdasarkan kedua tabel tersebut, nilai kuat tekan rata-rata tertinggi untuk mortar dengan fly ash PUSRI berada di angka 47,25 MPa, sedangkan untuk mortar dengan fly ash PTBA hanya berada di angka 7,28 MPa. Hal ini jelas menunjukkan bahwa dalam percobaan ini, mortar dengan fly ash PUSRI jauh lebih baik kualitasnya dibandingkan dengan mortar dengan fly ash PTBA di mana beda kuat tekan tertinggi rata-ratanya hingga > 39 MPa.

Na_2SiO_3 menjadi sumber silikat yang menjadi sumber dalam pembentukan jaringan stuktur aluminosilikat pada campuran mortar geopolimer [6]. Namun jika jumlahnya

terlalu banyak, maka alkali aktivator yang dihasilkan akan menjadi sangat kental yang dapat menghambat reaksi antar partikel. Adapun pula bila NaOH yang disediakan terlalu sedikit maka proses pelarutan *fly ash* menjadi tidak maksimal di mana jumlah monomer reaktif yang terbentuk menjadi berkurang. Seperti yang bisa dilihat pada tabel 7 dan tabel 8, kuat tekan kedua mortar dengan jenis *fly ash* yang berbeda, sama-sama memiliki nilai kuat tekan yang sangat rendah pada variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1 : 1$ dan variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1,5 : 1$ dari rata-rata kuat tekan masing-masing mortar. Nilai kuat tekan sangatlah rendah, bahkan untuk mortar dengan *fly ash* PTBA, nilai kuat tekan mortarnya < 1 MPa pada hari ke-3 dan pada hari ke-28 sebesar 2,77 MPa. Nilai kuat tekan mortar dengan *fly ash* PUSRI juga tergolong kecil dibandingkan dengan variasi lainnya di mana pada hari ke-3 nilai kuat tekannya sebesar 2,31 MPa, dan pada hari ke-28 hanya sebesar 5,8 MPa. Nilai rasio perbandingan NaOH terhadap Na_2SiO_3 berbanding terbalik dengan kuat tekan geopolimer. Semakin besar perbandingan NaOH terhadap Na_2SiO_3 dalam komposisi geopolimer menghasilkan kuat tekan yang lebih kecil sesuai dengan percobaan yang telah dilakukan. Semakin banyak komponen Natrium Silikat (Na_2SiO_3) dalam komposisi geopolimer akan

menghasilkan kuat tekan yang lebih baik. Namun perlu dilihat kembali pengaruh komponen tersebut dalam kemudahan pelaksanaan geopolimer dan juga batasan jumlah kandungan Natrium Silikat berbanding dengan NaOH yang mana bila terlalu banyak kandungan Natrium Silikat juga dapat menurunkan kuat tekan mortar. Berdasarkan percobaan yang dilakukan, untuk variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1 : 1$ dan variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 1,5 : 1$, berdasarkan data nilai kuat tekan yang dihasilkan, NaOH yang terkandung di dalam variasi tersebut bisa dikatakan berlebih. Bila NaOH yang mendominasi dan jumlah Na_2SiO_3 yang lebih sedikit, maka jaringan struktur aluminosilikat yang menjadi inti kekuatan untuk pembentukan geopolimer akan berkurang yang membuat mortar memiliki nilai kuat tekan yang lemah.. Berdasarkan tabel 8, data nilai kuat tekan mortar geopolimer *fly ash* PTBA dengan variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ yang didapat ini hasilnya cenderung memiliki kesamaan dengan nilai kuat tekan mortar geopolimer *fly ash* PUSRI dengan variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ di mana sama-sama memiliki nilai kuat tekan tertinggi pada saat campuran menggunakan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH} = 2,5:1$ dengan nilai kuat tekan tertinggi rata-rata mortar dengan *fly ash* PUSRI di angka 43,48 MPa dan untuk mortar dengan *fly ash* PTBA di angka 6,02 MPa.



Gambar 5. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer

4 KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, berikut merupakan kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, mortar geopolimer yang dibuat menggunakan *fly ash* dengan tingkat kereaktifan tinggi dan bentuk partikel yang lebih seragam menunjukkan performa yang jauh lebih baik. Mortar dengan *fly ash* dari PT Pupuk Sriwidjaja (PUSRI) menghasilkan kuat tekan sebesar 41,83 MPa pada hari ke-28, sedangkan mortar dengan *fly ash* dari PT Bukit Asam (PTBA) hanya mencapai 6,02 MPa. Perbedaan ini menunjukkan bahwa karakteristik fisik dan kimia dari *fly ash* sangat memengaruhi efektivitas pembentukan jaringan geopolimer, yang pada akhirnya menentukan kekuatan akhir mortar.
2. Pengujian terhadap variasi rasio alkali aktivator terhadap *fly ash* (AA : FA) menunjukkan bahwa rasio 0,6 menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu sebesar 47,25 MPa untuk mortar berbasis *fly ash* PUSRI. Hasil ini melampaui penelitian sebelumnya yang menggunakan rasio 0,5 dan menghasilkan kuat tekan

sebesar 45,25 MPa. Sementara itu, mortar dengan *fly ash* PTBA hanya mampu mencapai rata-rata 7,28 MPa. Selisih nilai kuat tekan yang signifikan antara kedua jenis *fly ash*, yang mencapai lebih dari 39 MPa, mengindikasikan bahwa kualitas dan komposisi kimia *fly ash* dari PUSRI jauh lebih mendukung pembentukan mortar geopolimer yang kuat.

3. Berdasarkan variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$, diperoleh bahwa rasio optimal untuk kedua jenis *fly ash* adalah 2,5:1. Pada rasio ini, mortar dengan *fly ash* PUSRI menunjukkan kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 43,48 MPa, sementara mortar dengan *fly ash* PTBA mencapai 6,02 MPa. Rasio ini terbukti mampu memberikan komposisi yang seimbang antara natrium silikat dan natrium hidroksida dalam pembentukan jaringan aluminosilikat, yang menjadi dasar dari struktur geopolimer. Konsistensi hasil antara kedua jenis mortar pada rasio ini menjadikannya sebagai acuan komposisi terbaik dalam pembuatan mortar geopolimer

Daftar Pustaka

- [1] F. Musfirah, *STUDI KARAKTERISTIK EFFLORESCENCE MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN FLY ASH DAN SERBUK KAYU*. 2020. [Daring]. Tersedia pada: <https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/2133/>
- [2] W. Millenia, "Sifat Fisik Dan Mekanik Mortar Geopolimer Dengan Variasi Rasio Alkali Aktivator Terhadap Prekursor," 2022.
- [3] E. Riyanto, E. Widyananto, dan R. R. Renaldy, "Analisis Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Silica Fume dan Kapur Tohor," *INERSIA Informasi dan Ekspose Has. Ris. Tek. Sipil dan Arsit.*, vol. 17, no. 1, hal. 19–26, 2021, doi: 10.21831/inersia.v17i1.35901.
- [4] J. J. Ekaputri dan M. S. Al Bari, "The comparison of regulations on fly ash as a hazardous waste in Indonesia and several countries," *Media Komun. Tek. Sipil*, vol. 26, no. 2, hal. 150–162, 2020, doi: 10.14710/mkts.v26i2.30762.
- [5] D. S. Budiningrum, A. Kustirini, B. Purnijanto, D. Mahasukma, dan T. Y. Utama, "Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Pltu Tanjungjati B Jepara," *Bangun Rekaprima*, vol. 7, no. 2, hal. 55, 2021, doi: 10.32497/bangunrekaprima.v7i2.2997.
- [6] F. Sandi Faradilla, "GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR ABU LAYANG DARI EMPAT PLTU: HOLCIM, PAITON 1-2, KETAPANG DAN WILMAR," hal. 1–109, 2019, doi: https://repository.its.ac.id/64207/7/01211540000045-Undergraduate_Thesis.pdf.
- [7] W. W. A. Zailani, M. M. A. Abdullah, M. F. Arshad, D. D. Burduhos-Nergis, dan M. F. M. Tahir, "Effect of Iron Oxide (Fe_2O_3) on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 877, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/877/1/012017.
- [8] W. Dwi Pratiwi, "Hubungan Morfologi, Ukuran Partikel dan Keamorfian Fly Ash dengan Kuat Tekan Pasta High-Volume Fly Ash (HVFA) Cement," *Semin. Master 2019*, no. October, hal. 93–98, 2019, [Daring]. Tersedia pada: <http://journal.ppns.ac.id/index.php/SeminarMASTER>