

OPTIMASI KUAT TEKAN PASTA GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR FLY ASH DENGAN VARIASI RASIO MASSA FLY ASH DAN ALKALI AKTIVATOR (FA/AA)

Budi Nayobi^{1,*}, Rosidawani¹, Bimo Brata Adhitya¹

¹)Program Studi Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya
Jalan Srijaya Negara, Bukit Lama, Kec. Ilir Barat I, Kota Palembang,
Sumatera Selatan 30139

^{*)}Correspondent Author: bnayobi@gmail.com

Abstract

Cement production generates high CO₂ emissions, which have a negative impact on the environment. To reduce this carbon footprint, alternative materials to cement are needed. Geopolymer paste presents a promising solution as it utilizes industrial waste such as fly ash, is environmentally friendly, and can achieve good mechanical strength. This study aims to optimize the compressive strength of fly ash-based geopolymer paste by varying the mass ratio of fly ash to alkaline activator (FA/AA). The fly ash used was characterized using X-Ray Fluorescence (XRF), X-Ray Diffraction (XRD), and Scanning Electron Microscope (SEM) to determine its crystal structure, chemical composition, and particle morphology. The characterization results indicate that the fly ash is predominantly amorphous, classified as Class F according to ASTM C618-2019, and has spherical particles with sizes less than 2 µm, making it suitable as a geopolymer precursor. Test specimens were prepared in the form of 50 mm × 50 mm × 50 mm cubes, and compressive strength tests were conducted at 3, 7, and 28 days with varying FA/AA ratios. The test results showed that compressive strength increased with the FA/AA ratio up to an optimum ratio of 2.5, then decreased at a ratio of 3. This indicates that the FA/AA ratio significantly affects the development of compressive strength in geopolymer paste. These findings are expected to serve as a foundation for developing environmentally friendly alternative materials to replace Portland cement.

Keywords: geopolymer paste, fly ash, alkali activator, FA/AA ratio, compressive strength, oven curing

PENDAHULUAN

Produksi semen merupakan salah satu proses industri yang tidak ramah lingkungan karena membutuhkan energi dalam jumlah besar dan menghasilkan emisi karbon yang signifikan. Salah satu tahapan utama dalam proses ini adalah sintering bahan berkapur dan tanah liat, yang menjadi penyumbang utama emisi karbon dioksida (CO₂) ke

atmosfer. Secara global, produksi semen Portland (*Ordinary Portland Cement*/OPC) mencapai lebih dari 4 miliar ton per tahun. Proses produksi OPC secara luas diakui sebagai kontributor utama emisi gas rumah kaca, menyumbang sekitar 6–7% dari total emisi CO₂ global, sebagaimana dilaporkan oleh *International Energy Agency* (IEA) (Ilkentapar dkk., 2017).

Di bidang konstruksi, beton merupakan salah satu bahan bangunan yang paling banyak digunakan karena kekuatan dan keandalannya. OPC masih menjadi bahan pengikat utama dalam campuran beton, berperan penting dalam menyatukan komponen-komponen penyusunnya. OPC telah terbukti efektif sebagai bahan pengikat, tidak hanya pada beton, tetapi juga pada berbagai material bangunan lainnya. Seiring dengan pesatnya pertumbuhan infrastruktur global, penggunaan OPC diperkirakan akan terus meningkat secara signifikan. Bahkan, permintaan global terhadap OPC diproyeksikan meningkat hampir 200% pada tahun 2050 (Fahim dkk., 2017).

Namun, penggunaan semen secara terus-menerus akan menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan, terutama karena tingginya emisi karbon dioksida yang dihasilkan selama proses produksinya. Oleh karena itu, berbagai upaya telah dilakukan untuk mencari alternatif pengganti semen yang memiliki kinerja serupa, tetapi lebih ramah lingkungan dan mampu mengurangi emisi karbon dioksida serta dampak lingkungan lainnya. Salah satu material inovatif yang dianggap memiliki potensi besar untuk direalisasikan sebagai solusi adalah beton geopolimer, yang dikenal sebagai bahan ramah lingkungan dengan emisi karbon yang jauh lebih rendah dibandingkan beton berbasis semen konvensional.

Geopolimer merupakan alternatif yang ramah lingkungan untuk menggantikan semen Portland dalam produksi beton. Material ini disintesis

melalui proses kimia yang dikenal sebagai geopolimerisasi, yaitu reaksi antara bahan aluminosilikat seperti abu terbang dan terak tanur sembur, yang merupakan produk sampingan industri dengan alkali aktivator (Hadi dkk., 2018). Geopolimer telah diusulkan sebagai bahan pengikat alternatif bagi semen Portland biasa (OPC) karena kemampuannya dalam menghasilkan beton yang berkelanjutan dan rendah emisi karbon. Proses produksi geopolimer melibatkan aktivasi bahan aluminosilikat berkalsium rendah menggunakan larutan basa, seperti natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_4) (Fu dkk., 2020). Prekursor aluminosilikat yang umum digunakan dalam pembuatan geopolimer meliputi metakaolin, yang diperoleh dari kalsinasi lempung kaolinit, serta *fly ash* yang merupakan residu hasil pembakaran batu bara.

Aliabdo dkk. (2016) menemukan bahwa kuat tekan beton geopolimer meningkat seiring dengan peningkatan rasio prekursor terhadap alkali aktivator hingga mencapai nilai 2.5, namun setelah itu mengalami penurunan. Sementara itu, penelitian lain oleh H. Unis Ahmed dkk. (2022) menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan terjadi hingga rasio prekursor terhadap aktivator mencapai 1.82. Temuan dari berbagai studi ini mengindikasikan adanya inkonsistensi dalam rasio massa *fly ash* (FA) terhadap massa alkali aktivator (AA) yang menghasilkan kuat tekan optimum pada campuran beton geopolimer. Sebagai bahan utama dalam geopolimer, *fly ash* sebagai prekursor, serta natrium silikat

(Na_2SiO_4) dan natrium hidroksida (NaOH) sebagai aktivator, memiliki komposisi dan rasio tertentu yang sangat memengaruhi karakteristik campuran geopolimer yang dihasilkan. Oleh karena itu, diperlukan kajian lebih lanjut mengenai rasio FA/AA yang tepat untuk memperoleh campuran geopolimer dengan kuat tekan yang optimal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Struktur, Konstruksi, dan Material, Teknik Sipil Universitas Sriwijaya. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi rasio massa *fly ash* terhadap alkali aktivator (FA/AA) terhadap kuat tekan pasta geopolimer, serta mengidentifikasi rasio optimum yang menghasilkan kuat tekan tertinggi.

Langkah pertama dalam penelitian ini adalah melakukan uji karakteristik *fly ash* dari PT. Pupuk Sriwijaya sebagai bahan utama dalam pembuatan pasta geopolimer. Pengujian dilakukan menggunakan tiga metode, yaitu *X-ray Diffraction (XRD)* untuk mengidentifikasi fase mineralogi dan struktur kristal, *X-ray Fluorescence (XRF)* untuk mengetahui komposisi kimia unsur penyusun, serta *Scanning Electron Microscopy (SEM)* untuk mengamati morfologi dan struktur permukaan partikel *fly ash* secara mikroskopis. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan *fly ash* sebagai prekursor dalam sistem geopolimer, khususnya dalam hal kandungan aluminosilikat dan ukuran

partikel yang berperan penting dalam proses geopolimerisasi. Hasil karakterisasi ini menjadi dasar penting dalam memastikan bahwa *fly ash* yang digunakan memenuhi syarat sebagai material reaktif yang dapat membentuk pasta geopolimer dengan kuat tekan yang optimal.

Pembuatan benda uji pasta geopolimer menggunakan cetakan kubus dengan ukuran 50mm x 50mm x 50mm dan dilakukan dengan variasi rasio massa *fly ash* terhadap alkali aktivator (FA/AA) untuk mengetahui pengaruh rasio tersebut terhadap kuat tekan pasta geopolimer. Proporsi campuran yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada hasil studi literatur dari penelitian sebelumnya. Adapun Proporsi campuran dengan variasi rasio massa *fly ash* terhadap alkali aktivator (FA/AA) dapat dilihat secara rinci pada Tabel 1.

Pada Tabel 1, proporsi pasta geopolimer dengan variasi rasio FA/AA yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada penelitian-penelitian sebelumnya. Aliabdo dkk. (2016) dan Pesik dkk. (2018) melaporkan bahwa rentang rasio FA/AA yang efektif berada antara 1 hingga 3. Selain itu, penelitian oleh H. Unis Ahmed dkk. (2022) dan Hadi dkk. (2018) menunjukkan bahwa kuat tekan optimum geopolimer diperoleh dengan menggunakan larutan NaOH berkonsentrasi 16 M. Rasio masa Na_2SiO_4 terhadap NaOH sebesar 2.5 yang diterapkan dalam penelitian ini juga mengacu pada studi Aliabdo dkk. (2016). Proses *curing* dilakukan menggunakan oven pada suhu 80°C

selama 24 jam, sesuai dengan metode yang diterapkan dalam penelitian Adhitya (2024).

Tabel 1. Proporsi Campuran Pasta Geopolimer dengan Variasi FA/AA

Sampel	FA/AA	Molaritas NaOH	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Metode curing
F1	1	16	2.5	oven curing 80°C selama 24 jam
F2	1.5	16	2.5	oven curing 80°C selama 24 jam
F3	2	16	2.5	oven curing 80°C selama 24 jam
F4	2.5	16	2.5	oven curing 80°C selama 24 jam
F5	3	16	2.5	oven curing 80°C selama 24 jam

Tabel 2. Job Mix Design (JMD) untuk 3 benda uji pasta geopolimer variasi rasio massa FA/AA

Sampel	FA/AA	Binder (FA/AA)		
		Prekursor	Alkali Aktivator	
		Fly Ash (Kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH (kg)
F1	1	0.700	0.700	0.200
F2	1.5	0.700	0.467	0.133
F3	2	0.700	0.350	0.100
F4	2.5	0.700	0.280	0.080
F5	3	0.700	0.233	0.067

Proses pembuatan benda uji dimulai dengan menyiapkan bahan utama yaitu *fly ash*, alkali aktivator berupa larutan NaOH 16 M dan Na₂SiO₃. Setelah bahan-bahan dilakukan secara hati-hati untuk memastikan distribusi campuran merata dan menghindari adanya rongga udara yang dapat memengaruhi kekuatan pasta. Setelah pengisian cetakan, benda

dicampur sesuai proporsi yang telah ditentukan, campuran tersebut dituangkan ke dalam cetakan kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm yang telah disiapkan. Pencetakan uji menjalani proses curing dalam oven pada suhu 80°C selama 24 jam, kemudian dilanjutkan dengan *ambient curing* menggunakan *plastic wrap*. Pengujian kuat tekan dilakukan setelah

benda uji mencapai umur 3, 7, dan 28 hari. *Job Mix Design* (JMD) untuk tiga benda uji dengan variasi rasio massa *fly ash* terhadap alkali aktivator (FA/AA) dapat dilihat secara rinci pada Tabel 2.

Job Mix Design (JMD) pasta geopolimer dalam penelitian ini disusun berdasarkan proporsi campuran yang disajikan pada Tabel 1, dengan penyesuaian terhadap ukuran benda uji yang digunakan. Penyesuaian ini dilakukan untuk memastikan volume dan komposisi material sesuai dengan kebutuhan cetakan kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm, sehingga hasil pengujian kuat tekan dapat merepresentasikan performa campuran secara akurat.

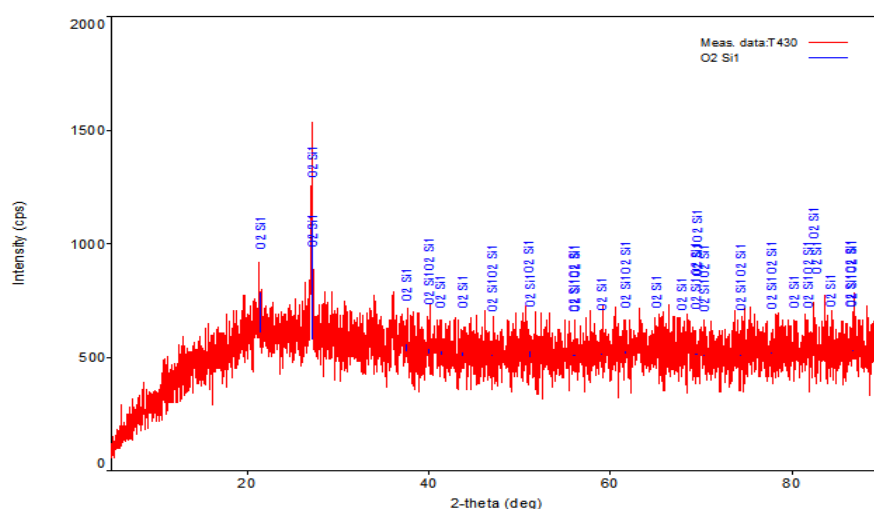
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian *Fly Ash*

Fly ash yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT Pupuk Sriwijaya (Pusri). Untuk mengetahui karakteristiknya, dilakukan tiga jenis pengujian, yaitu XRF, XRD, dan SEM.

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

Pengujian XRD bertujuan untuk menemukan dan mengidentifikasi fase-fase kristal yang terdapat dalam *fly ash*. Gambar 1 hasil XRD *fly ash* menunjukkan puncak dengan intensitas tertinggi sebesar 1533.33 cps yang terletak pada sudut 2θ sebesar 27.14° , yang mengindikasikan adanya puncak difraksi yang signifikan.



Gambar 1. Hasil Pengujian XRD

Puncak ini biasanya terkait dengan keberadaan kristal SiO_3 , puncak yang tajam dan jelas pada sudut 2θ ini menunjukkan struktur kristalin yang teratur, dengan SiO_3 sering kali muncul dalam bentuk kuarsa, yang memiliki puncak difraksi yang khas pada sudut tersebut. Intensitas yang tinggi pada

puncak ini menunjukkan dominasi fase kristalin SiO_3 dalam sampel, yang mencerminkan keberadaan silika dalam jumlah yang signifikan. Hal ini juga menunjukkan bahwa SiO_3 memainkan peran penting dalam sifat fisik dan mekanik material yang dianalisis.

Untuk memastikan fase dominan dalam material *fly ash*, dilakukan analisis kuantitatif terhadap pola XRD dengan menghitung luas area puncak kristalin dan area total menggunakan perangkat lunak OriginPro®8.5. Metode ini didasarkan pada pemisahan puncak (*peak deconvolution*) dan perhitungan luas masing-masing fase sesuai dengan Rumus 1 dan Rumus 2. yang merepresentasikan fraksi kristalin dan amorf secara proporsional terhadap total intensitas difraksi.

$$\text{Kristalin (\%)} = \frac{\text{Luas Area Titik Puncak}}{\text{Luas Area Total}} \times 100\% \dots (1)$$

$$\text{Amorf (\%)} = 100\% - \text{Kristalin (\%)} \dots (2)$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa persentase fase kristalin sebesar 2.83%, sedangkan fase amorf mencapai 97.17%. Nilai ini mengindikasikan bahwa *fly ash* yang dianalisis berfase dominan amorf, sehingga memiliki potensi reaktivitas pozzolan yang tinggi dan sangat sesuai untuk digunakan sebagai bahan utama dalam pasta geopolimer, karna bahan pozzolan untuk beton atau bahan komposit tertentu, material dianggap dominan amorf jika kandungan amorf-nya lebih dari 85% (Narmuluk & Nawa, 2021).

b. Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)

Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa kimia yang terkandung dalam *fly ash* serta untuk mengklasifikasikan jenis *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini. Berdasarkan hasil

pengujian yang ditampilkan pada Tabel 3 dan merujuk pada standar ASTM C618-2019, *fly ash* yang digunakan termasuk dalam kategori kelas F. *Fly ash* kelas F ditandai dengan kandungan gabungan SiO₃, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ yang mencapai minimal 50%, kandungan CaO tidak melebihi 18%, dan kadar SO₃ maksimal 5% (ASTM, 2019). Klasifikasi ini penting karena memengaruhi reaktivitas *fly ash* dalam proses geopolimerisasi, terutama dalam hal pembentukan struktur ikatan yang kuat dan stabil.

Tabel 3. Hasil Pengujian XRF

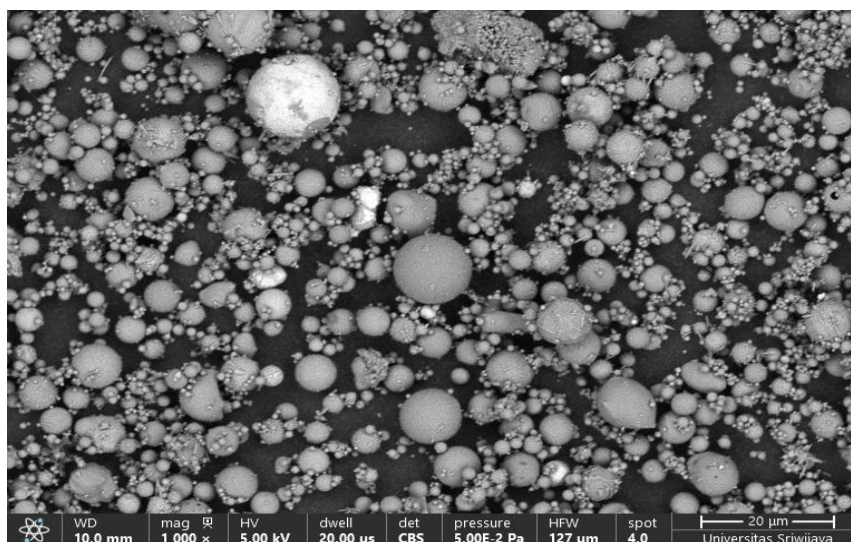
Komposisi Kimia	Jumlah (%)
SiO ₂	50.513
Al ₂ O ₃	22.944
Fe ₂ O ₃	11.298
CaO	4.927
Na ₂ O	4.472
MgO	1.853
SO ₃	1.526
K ₂ O	1.369
TiO ₂	0.837
P ₂ O ₅	0.174
Mn ₃ O ₄	0.070

c. Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM)

Pengujian Scanning Electron Microscope (SEM) bermaksud menampilkan struktur butiran *fly ash*. Hasil pengujian SEM menunjukkan bahwa butiran *fly ash* umumnya berbentuk bulat dan memiliki ukuran

diameter kurang dari $2\mu\text{m}$, seperti yang terlihat pada Gambar 2 dengan pembesaran 1000x. Bentuk butiran *fly ash* yang bulat memudahkan *fly ash* untuk bereaksi dengan senyawa lain selama proses pencampuran beton disebabkan derajat keamorfian *fly ash* yang semakin tinggi dan semakin reaktif sehingga akan memberikan kontribusi kuat tekan dari reaksi pozzolanik *fly ash* (Dwi Pratiwi, 2019). Bentuk sferis dan ukuran yang relatif kecil ini memberikan luas permukaan

yang tinggi, sehingga meningkatkan reaktivitas silika dan alumina terhadap larutan alkali pada proses geopolimerisasi. Selain itu, distribusi ukuran partikel yang merata memungkinkan penyusunan partikel yang lebih rapat dan padat, sehingga dapat mengurangi porositas dan memperbaiki struktur mikro pasta geopolimer. Karakteristik morfologi ini secara keseluruhan mendukung terbentuknya ikatan geopolimer yang lebih kuat dan stabil.



Gambar 2. Hasil Pengujian SEM

Hasil Kuat Tekan Pasta Geopolimer Variasi *Fly Ash* terhadap Alkali Aktivator (FA/AA)

Nilai rasio FA/AA merupakan perbandingan antara massa *fly ash* dengan massa alkali aktivator. Semakin tinggi nilai rasio FA/AA maka *workability* geopolimer yang dibuat akan semakin rendah. Rasio FA/AA merupakan faktor yang dapat mempengaruhi sifat mekanik pasta geopolimer terutama kuat tekannya.

Hal ini dikarenakan jumlah *fly ash* dan aktivator alkali yang digunakan mempengaruhi reaksi geopolimerisasi antara kedua material tersebut. Diperlukan perbandingan *fly ash* dan aktivator alkali yang tepat untuk mendapatkan nilai kuat tekan yang optimal.

Menurut Aliabdo dkk (2016) Kuat tekan geopolimer menurun dengan meningkatnya rasio FA/AA hingga 2.5, sedangkan Joseph dan Mathew (2012) menemukan bahwa

kuat tekan geopolimer menurun hingga rasio FA/AA sebesar 1.82. Demikian pula, Shehab dkk (2016) menemukan bahwa dengan meningkatnya rasio larutan FA/AA, terjadi penurunan kuat tekan setelah spesimen berumur 7 dan 28 hari. Akan tetapi, beberapa penelitian menunjukkan bahwa kuat tekan geopolimer meningkat dengan meningkatnya rasio FA/AA (Vora dan Dave, 2013).

Penelitian ini meninjau pengaruh rasio massa *fly ash* terhadap alkali aktivator dengan variasi rasio 1, 1.5, 2, 2.5, dan 3 dalam campuran pasta geopolimer terhadap kuat tekan yang dihasilkan. Rasio ini merupakan perbandingan antara jumlah massa *fly ash* dengan total larutan alkali aktivator, yang terdiri dari natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3). Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur pasta 3, 7, dan 28 hari untuk melihat perkembangan kekuatan seiring waktu. Benda uji dibuat dalam bentuk kubus berukuran 5x5x5 cm, kemudian dilakukan proses curing dengan oven selama 24 jam. Setelah proses curing, benda uji dikeluarkan dari oven dan dibungkus menggunakan *plastic wrap* guna menjaga kelembaban hingga waktu pengujian.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengevaluasi bagaimana perubahan rasio *fly ash* terhadap alkali aktivator memengaruhi perkembangan kuat tekan pasta geopolimer pada berbagai umur, sehingga dapat diketahui rasio paling optimal yang menghasilkan performa mekanik terbaik.

Pada tabel 4 menunjukkan peningkatan nilai kuat tekan pasta geopolimer secara umum menunjukkan tren positif seiring meningkatnya rasio massa *fly ash* terhadap alkali aktivator (FA/AA) dari 1 hingga 2.5, sebelum akhirnya mengalami penurunan pada rasio FA/AA sebesar 3. Pada umur 3 hari, kuat tekan meningkat dari 5.74 MPa (FA/AA = 1) menjadi 12.02 MPa (FA/AA = 1.5), dengan kenaikan sebesar 109.58%. Selanjutnya, meningkat menjadi 21.65 MPa (FA/AA = 2), atau naik sebesar 277.17% dibanding rasio 1, dan mencapai maksimum sebesar 22.63 MPa (FA/AA = 2.5), meningkat 294.25% dari nilai awal.

Namun, pada rasio FA/AA sebesar 3, kuat tekan menurun menjadi 18.02 MPa, yang berarti terjadi penurunan sebesar 20.37% dibandingkan rasio 2.5. Demikian pula, pada umur 7 hari, kuat tekan bertambah dari 11.13 MPa (FA/AA = 1) menjadi 21.96 MPa (FA/AA = 1.5), meningkat sebesar 97.31%; kemudian naik menjadi 27.21 MPa (FA/AA = 2), atau naik sebesar 144.58% dibanding rasio 1; dan mencapai maksimum sebesar 29.64 MPa (FA/AA = 2.5), yang berarti meningkat 166.31% dari FA/AA = 1. Namun, terjadi penurunan kuat tekan pada rasio FA/AA sebesar 3, yaitu menjadi 25.82 MPa, atau turun 12.91% dibandingkan rasio 2.5. Pada umur 28 hari, tren peningkatan tetap konsisten, dimulai dari 20.30 MPa (FA/AA = 1), naik menjadi 26.58 MPa (FA/AA = 1.5), meningkat sebesar 30.94%. Kemudian naik lagi menjadi

41.84 MPa (FA/AA = 2), atau meningkat 106.15% dari rasio 1.

Nilai maksimum dicapai pada rasio FA/AA = 2.5 dengan kuat tekan 47.25 MPa, menunjukkan kenaikan sebesar 132.76% dari rasio 1. Namun, pada rasio FA/AA = 3, kuat tekan menurun menjadi 36.15 MPa, turun sebesar 23.50% dari nilai maksimum

pada rasio 2.5. Penurunan kuat tekan pada rasio FA/AA = 3 di seluruh umur pengujian mengindikasikan bahwa jumlah alkali aktivator tidak mencukupi untuk melarutkan *fly ash* secara optimal, sehingga reaksi geopolimerisasi tidak berlangsung sempurna dan mengurangi kekuatan akhir pasta geopolimer.

Tabel 4. Hasil Kuat tekan pasta Variasi FA/AA umur 3, 7, dan 28 hari

Sampel	FA/AA	Umur (hari)	Rata-rata Kuat Tekan (Mpa)
F1	1	3	5.74
		7	11.13
		28	20.30
F2	1.5	3	12.02
		7	21.96
		28	26.58
F3	2	3	21.65
		7	27.21
		28	41.84
F4	2.5	3	22.63
		7	29.64
		28	47.25
F5	3	3	18.02
		7	25.82
		28	36.15

Rasio FA/AA memberikan pengaruh positif terhadap sifat-sifat pasta geopolimer, meliputi *workability*, *setting time*, dan kuat tekan. Penurunan rasio ini akan meningkatkan *workability* dan menunda *setting time*. Sebaliknya, rasio FA/AA yang lebih tinggi menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dengan batas tertentu sampai pada rasio dimana campuran memiliki *fly ash* yang berlebih sehingga tidak bereaksi sempurna dengan alkali aktivator (Adhitya, 2024).

Setelah mencapai rasio FA/AA optimum kemudian mengalami penurunan kuat tekan di rasio FA/AA sebesar 3. Dalam kondisi ini, larutan alkali tidak cukup untuk melarutkan seluruh kandungan silika dan alumina yang terdapat dalam *fly ash* (Mishra dkk., 2020). Akibatnya, sebagian besar partikel *fly ash* tidak mengalami aktivasi dan tidak berpartisipasi dalam reaksi geopolimerisasi. Hal ini menyebabkan reaksi yang tidak efisien, dan hasil akhirnya adalah pasta dengan struktur mikro yang tidak padat, adanya rongga/pori, dan kuat tekan

yang menurun (Adam dkk., 2020). Hal ini sesuai dengan studi yang dilakukan oleh Loekito (2018) yang menunjukkan bahwa pada rasio *fly ash* terhadap alkali aktivator 2.5, diperoleh kuat tekan tertinggi pada umur 28 hari, yaitu 23.21 MPa. Penelitian ini menekankan pentingnya komposisi aktivator yang tepat untuk mencapai kekuatan mekanik yang optimal pada geopolimer pasta. Sengkey dkk. (2020) juga memperkuat hasil penelitian dimana kuat tekan optimum pada umur 7 hari dicapai pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2.5 dan rasio FA/AA sebesar 2.5. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio FA/AA sebesar 2.5 memberikan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan rasio lainnya.

Rasio FA/AA sebesar 2.5 memberikan kuat tekan paling tinggi karena pada rasio ini tersedia cukup banyak larutan alkali untuk melarutkan kandungan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dari *fly ash* secara optimal, sehingga mempercepat proses geopolimerisasi dan pembentukan struktur gel yang padat dan homogen. Pada tahap ini, reaksi kimia antara *fly ash* dan larutan alkali membentuk produk ikat utama berupa gel natrium aluminosilikat hidrat (N-A-S-H gel), yang berfungsi sebagai pengikat partikel dan penentu utama kekuatan mekanik (Zhang dkk., 2014).

Jika rasio alkali terlalu rendah, tidak semua *fly ash* bisa terlarut dan bereaksi, sehingga pembentukan gel N-A-S-H menjadi tidak maksimal. Sebaliknya, jika alkali terlalu berlebih (rasio lebih tinggi dari 2.5), sisa larutan

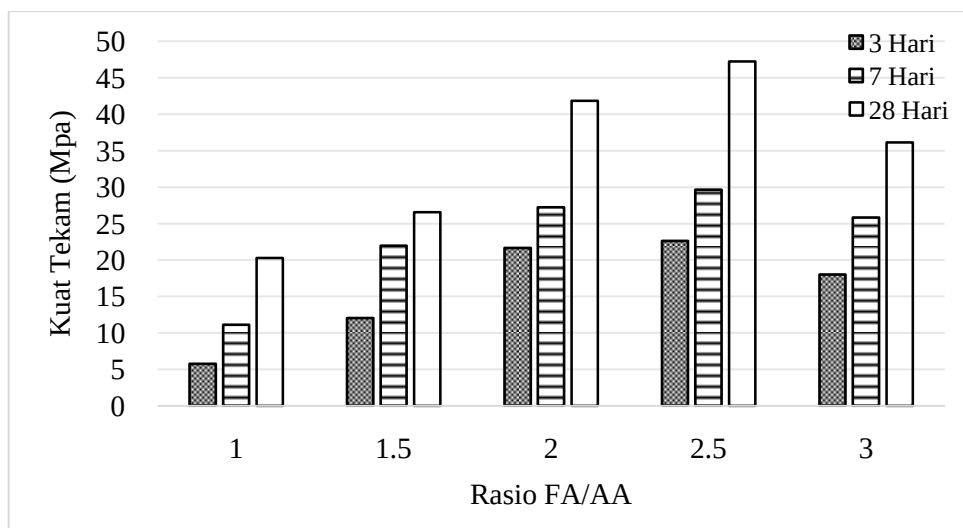
yang tidak bereaksi dapat menyebabkan kelebihan ion natrium dan meningkatkan porositas atau retakan mikro akibat eksudasi larutan, sehingga justru menurunkan kekuatan (Yadaf dkk., 2023). Oleh karena itu, rasio 2.5 menciptakan keseimbangan ideal antara jumlah reaktan (*fly ash*) dan aktivator akan menghasilkan ikatan antar partikel yang kuat dan mikrostruktur pasta yang lebih padat. Tren kenaikan dan penurunan kuat tekan pasta geopolimer dengan variasi rasio FA/AA dapat dilihat pada Gambar 3.

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan pasta geopolimer pada umur 3, 7, dan 28 hari yang disajikan pada Gambar 3, diketahui bahwa kuat tekan pasta geopolimer meningkat seiring dengan naiknya rasio FA/AA hingga mencapai nilai optimum pada rasio 2.5. Pada umur 3 hari, kuat tekan pasta geopolimer meningkat dari 5.74 MPa (FA/AA = 1) menjadi 12.02 MPa (FA/AA = 1.5), lalu naik lagi menjadi 21.65 MPa (FA/AA = 2), dan mencapai nilai maksimum 22.63 MPa (FA/AA = 2.5). Namun, saat rasio ditingkatkan menjadi 3, kuat tekan menurun menjadi 18.02 MPa. Hal serupa terjadi pada umur 7 hari, di mana kuat tekan meningkat dari 11.13 MPa (FA/AA = 1) menjadi 21.96 MPa (FA/AA = 1.5), kemudian naik menjadi 27.21 MPa (FA/AA = 2), dan mencapai puncaknya pada 29.64 MPa (FA/AA = 2.5). Namun, pada rasio FA/AA = 3, kuat tekan menurun menjadi 25.82 MPa. Pada umur 28 hari, tren peningkatan juga terlihat, dari 20.30 MPa (FA/AA = 1) menjadi

26.58 MPa (FA/AA = 1.5), kemudian 41.84 MPa (FA/AA = 2), dan mencapai maksimum 47.25 MPa (FA/AA = 2.5). Namun, ketika rasio FA/AA dinaikkan menjadi 3, kuat tekan justru menurun menjadi 36.15 MPa.

Nilai kuat tekan optimum yang dicapai pada rasio FA/AA sebesar 2.5 menunjukkan bahwa pada titik ini terjadi keseimbangan ideal antara jumlah *fly ash* sebagai sumber silikat dan aluminat dengan alkali aktivator yang berfungsi melarutkan dan mengaktifkan *fly ash*. Pada rasio ini, reaksi geopolimerisasi berlangsung

secara maksimal, menghasilkan struktur ikatan polimer yang padat, homogen, dan kuat sehingga memberikan nilai kuat tekan tertinggi di semua umur pengujian. Namun, ketika rasio FA/AA ditingkatkan menjadi 3, terjadi penurunan kuat tekan secara signifikan pada umur 3, 7, dan 28 hari. Hal ini disebabkan oleh jumlah alkali aktivator yang tidak mencukupi untuk melarutkan *fly ash* dalam jumlah besar. Akibatnya, sebagian *fly ash* tidak bereaksi, sehingga proses geopolimerisasi tidak berjalan sempurna.



Gambar 3. Kuat Tekan pasta Variasi FA/AA

Peningkatan rasio massa *fly ash* terhadap alkali aktivator (FA/AA) dari 1 hingga 2.5 menyebabkan kenaikan kuat tekan secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa pada rasio tersebut, larutan alkali (kombinasi NaOH dan Na₂SiO₃) masih mencukupi untuk melarutkan silika dan alumina dari *fly ash*, sehingga reaksi geopolimerisasi dapat berlangsung

secara optimal dan menghasilkan pembentukan gel natrium aluminosilikat hidrat (N-A-S-H) dalam jumlah yang cukup. Gel ini berperan penting dalam membentuk struktur ikatan antar partikel yang padat dan kuat, sehingga berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekuatan pasta (Loekito, 2018). Namun, ketika rasio FA/AA meningkat menjadi 3, terjadi

penurunan kuat tekan. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya jumlah larutan alkali yang tersedia untuk mengaktivasi *fly ash*, sehingga sebagian partikel tidak bereaksi dan mengakibatkan struktur mikro pasta menjadi tidak homogen dan lebih berpori. Kondisi ini menurunkan kekuatan mekanik pasta. Dengan demikian, rasio FA/AA sebesar 2,5 dapat dianggap sebagai rasio optimum yang memberikan keseimbangan ideal antara jumlah *fly ash* dan larutan aktivator untuk menghasilkan kuat tekan maksimum pada pasta geopolimer (Sengkey dkk., 2020; Adam dkk., 2020).

SIMPULAN

Pada penelitian ini, dilakukan pengujian karakteristik *fly ash* untuk memastikan kelayakannya sebagai prekursor dalam pembuatan pasta geopolimer. Hasil uji XRD menunjukkan bahwa *fly ash* yang digunakan didominasi oleh fase amorf sebesar 97.17%, yang menandakan tingkat reaktivitas yang tinggi dalam proses geopolimerisasi. Berdasarkan uji XRF, *fly ash* diklasifikasikan sebagai kelas F sesuai dengan standar ASTM C618-2019, karena kandungan gabungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 melebihi 50%, serta kandungan CaO dan SO_3 berada dalam batas yang ditetapkan. Sementara itu, hasil uji SEM menunjukkan bahwa butiran *fly ash* berbentuk bulat dengan ukuran diameter umumnya kurang dari 2 μm . Berdasarkan ketiga hasil pengujian tersebut, *fly ash* dinyatakan layak

digunakan sebagai material prekursor dalam pembuatan pasta geopolimer.

Dari hasil pengujian, kuat tekan pasta geopolimer meningkat seiring naiknya rasio FA/AA hingga mencapai nilai optimum pada rasio 2.5 untuk semua umur pengujian. Pada umur 3 hari, kuat tekan meningkat dari 5.74 MPa (FA/AA = 1) menjadi 22.63 MPa (FA/AA = 2.5), lalu menurun menjadi 18.02 MPa pada rasio 3. Tren serupa terjadi pada umur 7 hari (dari 11.13 MPa menjadi 29.64 MPa, lalu turun ke 25.82 MPa) dan 28 hari (dari 20.30 MPa menjadi 47.25 MPa, lalu turun ke 36.15 MPa). Nilai optimum pada rasio 2.5 menunjukkan keseimbangan ideal antara jumlah *fly ash* dan alkali aktivator, sehingga reaksi geopolimerisasi berlangsung maksimal. Sebaliknya, pada rasio 3, jumlah aktivator tidak mencukupi untuk melarutkan *fly ash* secara efektif, menyebabkan reaksi tidak sempurna dan penurunan kuat tekan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, A., Namira, S.A., Siregar, A.P. N., & Mustofa, 2020, *The Effect of Activator to Binder Ratio on the Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer Mortar in Sulphate Environment*, MATEC Web of Conferences, 331, 05002.
- Adhitya, Bimo Brata., 2024, *Karakteristik Agregat Buatan Geopolimer dalam Beton Normal*. Disertasi Doktor, Universitas Sriwijaya.
- Ahmed, H.U., Mahmood, L.J., Muhammad, M.A., Faraj, R.H.,

- Aljumaili, O.A., & Tayeh, B.A., 2022, *Geopolymer concrete as a cleaner construction material: An overview on materials and structural performances*, *Cleaner Materials*, 5, 100111.
- Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, A.E.M., & Salem, H.A, 2016, *Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance*, *Construction and Building Materials*, 121, 694–703.
- ASTM International, 2019. *ASTM C618-19: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Dwi Pratiwi, W, 2019, *Hubungan Morfologi, Ukuran Partikel dan Keamorfian Fly Ash dengan Kuat Tekan Pasta High-Volume Fly Ash (HVFA) Cement*, *Seminar Master 2019*, October, 93–98.
- Fahim Huseien, G., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S.K., & Abdulameer Hussein, A, 2017, *Geopolymer pastas as sustainable repair material: A comprehensive review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 (February 2016), 54–74.
- Fu, C., Ye, H., Zhu, K., Fang, D., & Zhou, J, 2020, *Alkali cation effects on chloride binding of alkali-activated fly ash and metakaolin geopolymers*. *Cement and Concrete Composites*, 114(June 2019), 103721.
- Hadi, M.N.S., Al-Azzawi, M., Yu, T, 2018, *Effects of fly ash characteristics and alkaline activator components on compressive strength of fly ash-based geopolymer pasta*. *Constr. Build. Mater.* 2018, 175, 41–54.
- İlkentapar, S., Atiş, C.D., Karahan, O., & Görür Avşaroğlu, E. B, 2017, *Influence of duration of heat curing and extra rest period after heat curing on the strength and transport characteristic of alkali activated class F fly ash geopolymer pasta*, *Construction and Building Materials*, 151, 363–369.
- Joseph, B., & Mathew, G, 2012, *Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete*. *Scientia Iranica*, 19(5), 1188–1194.
- Loekito, Irfan Prasetyo, & Arie Wardhono, 2018, *Pengaruh Variasi NaOH Dan Na₂SiO₃ Terhadap Kuat Tekan Dry Geopolimer Mortar Pada Kondisi Rasio Fly ash Terhadap Aktifator 2,5 : 1*, *Teknik Sipil*, October 2018, 1–7.
- Mishra, S., Choudhary, R., & Ghosal, S, 2020, *Effect of alkaline activator concentration on the mechanical properties of fly ash-based geopolymer pasta*. *Materials*, 13(7), 1546.
- Narmluk, S., & Nawa, T, 2021, *Reactivity of fly ash in cementitious systems: The role of*

- amorphous phase*, Materials and Structures, 54(1), 1–14.
- Pesik, S., Mandagi, R., & Langi, C., 2018, *Optimalisasi kuat tekan beton geopolimer dengan substitusi sebagian fly ash menggunakan kapur dan semen*, Jurnal Sipil Statik, 6(9), 753–760.
- Sengkey, L., Kalalo, R., & Karwur, F, 2020, *Pengaruh Rasio Alkali Aktivator terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi, Energi, dan Pengendalian Pencemaran (SNTEKPAN). Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- Vora, P.R., & Dave, U.V, 2013, *Parametric studies on compressive strength of geopolymers*, Procedia Engineering, 51, 210–219.
- Yadav, M., Kumar, L., Yadav, V., Jagannathan, K., Singh, V.N., Singh, S.P., & Ezhilselvi, V, 2023, *Optimizing the Fly Ash/Activator Ratio for a Fly Ash-Based Geopolymer through a Study of Microstructure, Thermal Stability, and Electrical Properties*. Ceramics, 6(4), 2352–2366.
- Zhang, Z., Provis, J.L., Reid, A., & Wang, H, 2014, *Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction*. Construction and Building Materials, 56, 113–127.