

Performa Variasi Rasio Alkali Aktivator terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash*

Sri Nur Akifa*¹, Medi Tikara*², Andi Arham Adam*³, Bayu Rahmat Ramadhan*⁴, Suci Amalia Namira Wahidin*⁵

Submit:
30 Juni 2025
Review:
9 July 2025
Revised:
8 Agustus 2025
Published :
23 Agustus 2025

*^{1,3,4,5}Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Tadulako, Kota Palu, Indonesia, , srinurakifa@untad.ac.id

*² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tadulako, Kota Palu, Indonesia, , medi_tikara@gmail.com

*Corresponding Author: srinurakifa@untad.ac.id

Abstrak

Kebutuhan bahan bangunan ramah lingkungan meningkat seiring upaya menekan emisi karbon dan memanfaatkan limbah industri. Semen Portland menyumbang sekitar 8% emisi CO₂ global. Geopolimer, berbasis aluminosilikat dari abu terbang, dikembangkan sebagai alternatif pengganti semen konvensional. Fokus dari penelitian ini adalah mengevaluasi dampak variasi komposisi dari alkali aktivator terhadap kuat tekan dari mortar geopolimer berbasis abu terbang tipe F. Material abu terbang diperoleh dari PLTU Mpanau dan diaktifkan menggunakan kombinasi Sodium Silikat (Na₂SiO₃) dan Sodium Hidroksida (NaOH). Sampel uji berupa mortar dengan bentuk kubus berukuran 50 × 50 × 50 mm yang rasio massa abu terbang terhadap pasir sebesar 1 : 2,75, serta rasio air terhadap padatan (w/s) 0,35. Aktivator diberikan dalam tiga variasi dosis, yaitu 25%, 40%, dan 55% dari berat abu terbang. Variasi dari Sodium Silikat berbanding dengan aktivator (W/A) yaitu 0; 0,3; 0,5; 0,7; dan 1. Pengujian kuat tekan terhadap mortar dilakukan pada umur ke 3, 7, 14, dan 28 hari, untuk mengevaluasi perkembangan kekuatan mekanik seiring waktu. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan dosis aktivator dan nilai W/A secara signifikan mempengaruhi karakteristik kuat tekan mortar. Kuat tekan optimum sebesar 24,72 MPa tercapai pada komposisi dosis aktivator 55% dan rasio W/A 0,5 pada umur 28 hari. Nilai tersebut menunjukkan bahwa mortar geopolimer dengan komposisi tersebut memiliki potensi untuk diaplikasikan sebagai elemen struktural alternatif yang ramah lingkungan.

Kata kunci: Abu Terbang, Alkali Aktivator, Geopolimer, Kuat Tekan, Rasio W/A

Abstract

The demand for environmentally friendly construction materials is increasing in line with efforts to reduce carbon emissions and utilize industrial waste. Portland cement contributes approximately 8% of global CO₂ emissions. Geopolymers, derived from aluminosilicate-based fly ash, have been developed as an alternative to conventional cement. The aim of this study is to evaluate the effect of varying alkali activator compositions on the compressive strength of fly ash-based geopolimer mortar type F. The fly ash was obtained from the Mpanau power plant and activated using a combination of Sodium Silicate (Na₂SiO₃) and Sodium Hydroxide (NaOH). The samples were prepared in the form of 50 × 50 × 50 mm cube mortars with a mass ratio of fly ash to sand of 1:2.75 and a water-to-solid ratio (w/s) of 0.35. The activator dosages applied were 25%, 40%, and 55% of the fly ash weight, with the ratio of Sodium Silicate to total activator (W/A) set at 0, 0.3, 0.5, 0.7, and 1. Compressive strength tests were conducted at curing ages of 3, 7, 14, and 28 days to assess the development of mechanical properties over time. The results indicated that increasing both the activator dosage and W/A ratio significantly affected the compressive strength characteristics of the mortar. The optimum compressive strength of 24.72 MPa was achieved with an

activator dosage of 55% and a W/A ratio of 0.5 at 28 days. These findings suggest that geopolymer mortar with this composition has the potential to be applied as an environmentally friendly alternative structural material.

Keywords: *Fly Ash, Alkali Activator, Geopolymer, Compressive Strength, W/A ratio.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan akan bahan bangunan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan telah menjadi isu utama dalam bidang konstruksi, terutama dalam konteks pengurangan emisi karbon dan pemanfaatan limbah industri terutama Sulawesi Tengah sebagai daerah pengguna PLTU. Sekitar 8% dari emisi karbon dioksida global berasal dari proses pembuatan semen portland, dimana bahan ini merupakan pengikat utama dari beton [1]. Untuk mengatasi hal ini, material alternatif seperti geopolimer mulai dikembangkan sebagai pengganti semen konvensional. Geopolimer adalah material berbasis aluminosilikat yang dapat terbentuk melalui reaksi aktivasi alkali, biasanya menggunakan abu terbang sebagai bahan utama [2].

Abu terbang tipe F mengandung banyak zat silika dan alumina yang merupakan limbah padat hasil pembakaran batubara yang masih belum dimanfaatkan secara optimal di berbagai daerah termasuk di Indonesia [3]. Padahal, dengan aktivator alkali yang tepat, abu terbang dapat diubah menjadi material konstruksi yang memiliki kekuatan mekanik tinggi dan ketahanan kimia yang baik. Salah satu tantangan utama dalam pengembangan mortar geopolimer adalah menentukan komposisi alkali aktivator yang ideal untuk menghasilkan performa mekanik yang optimum, khususnya kuat tekan [4],[5].

Beberapa studi sebelumnya telah mengevaluasi pengaruh rasio Sodium Silikat terhadap Sodium Hidroksida dalam aktivasi abu terbang terhadap kuat tekan. Penelitian oleh [6] menunjukkan bahwa perbandingan molar serta konsentrasi larutan NaOH berpengaruh signifikan terhadap karakteristik awal pembentukan struktur geopolimer. Studi lain oleh [7], [8] menemukan bahwa peningkatan rasio Sodium Silikat terhadap NaOH dapat meningkatkan kekuatan awal mortar, namun berdampak negatif pada durabilitas jika dosis tidak dikontrol dengan baik. Selain itu, [9] menekankan pentingnya kontrol terhadap rasio air terhadap solid dan total dosis aktivator untuk menghindari segregasi dan memastikan reaksi polimerisasi berjalan optimal. Meskipun penelitian mengenai mortar geopolimer telah banyak dilakukan, referensi yang membahas pengaruh variasi dosis total aktivator terhadap berat abu terbang dengan mempertimbangkan rasio Sodium Silikat terhadap total aktivator (W/A) masih terbatas. Penelitian ini dilakukan guna mengevaluasi secara sistematis kombinasi antara dosis aktivator dan rasio W/A terhadap perkembangan kuat tekan mortar geopolimer berbasis abu terbang tipe F dari PLTU Mpanau. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini yaitu memberikan kontribusi dalam penyusunan formulasi mortar geopolimer yang lebih efisien dan ramah lingkungan sebagai material struktural alternatif.

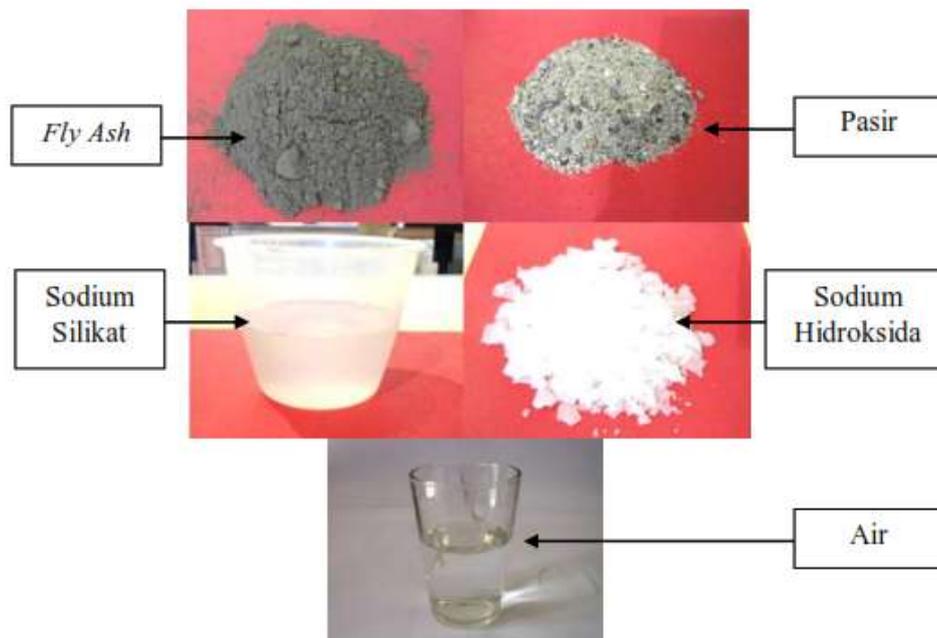
METODOLOGI

1. Analisis Bahan

Sulawesi Tengah, sebagai salah satu provinsi dengan pertumbuhan industri energi yang pesat, salah satunya yaitu PLTU Mpanau di Kota Palu. Operasional PLTU menghasilkan limbah berupa *fly ash* dalam jumlah besar yang belum optimal pemanfaatannya, sehingga *fly ash* yang dimanfaatkan sebagai bahan utama dalam pembuatan mortar geopolimer tidak hanya mendukung pengurangan emisi karbon, tetapi juga berkontribusi pada pengelolaan limbah industri yang berkelanjutan di wilayah tersebut. Hal ini menjadikan penelitian

geopolimer berbasis *fly ash* sangat relevan untuk dikembangkan secara lokal, sekaligus memberi nilai tambah pada limbah industri yang tersedia melimpah.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa variasi rasio Sodium Silikat terhadap Sodium Hidroksida ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) dan dosis total aktivator sangat memengaruhi sifat mekanik mortar geopolimer [10][6]. Variasi spesifik antara dosis aktivator terhadap berat Na_2SiO_3 terhadap total aktivator (W/A) yang mana W adalah *waterlass* dan A adalah alkali aktivator dalam konteks *fly ash* dari PLTU lokal masih terbatas. Bahan-bahan utama yang digunakan untuk formulasi mortar geopolimer telah dipilih dan dikarakterisasi secara cermat. Bahan dasar aluminosilikat adalah abu terbang tipe F dari PLTU Mpanau. Abu terbang banyak mengandung silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3). Material ini berpotensi besar sebagai bahan dasar dalam sintesis geopolimer. Material mortar geopolimer pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 berikut.



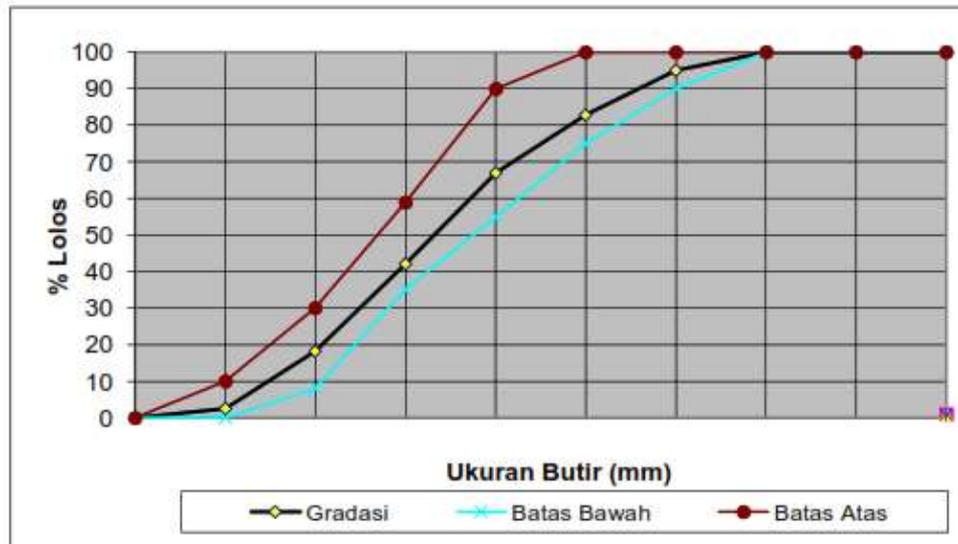
Gambar 1. Material Mortar Geopolimer

Pada Tabel 1 dapat dilihat hasil pemeriksaan dari kandungan kimia yang terdapat pada abu terbang hasil produksi PLTU Mpanau.

Tabel 1. Komposisi *Fly Ash*

Oxide	% massa
SiO_2	51,50
Al_2O_3	17,26
Fe_2O_3	25,54
CaO	2,09
K_2O	1,23
TiO_2	0,95
MnO	0,48
P_2O_5	0,25
Oxide lain	0,70
Total	100

Dalam penelitian ini, pasir alami dari Sungai Palu digunakan sebagai Agregat Halus. Pasir ini telah melalui proses penyaringan dan pengeringan untuk memenuhi standar agregat pada campuran mortar. Karakteristik kehalusan pasir diukur dengan Modulus Halus Butir (MHB) sebesar 2.925, sebagaimana detailnya dapat dilihat pada Gambar 2. Selanjutnya, larutan alkali yang berfungsi sebagai aktivator disiapkan dari campuran Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dan Sodium Hidroksida (NaOH) dengan konsentrasi 10M. Kedua komponen ini berperan penting dalam menginisiasi reaksi geopolimerisasi.



Gambar 2. Grafik Gradasi Agregat Halus

2. Mix Desain

Perencanaan komposisi mortar dilakukan dengan memvariasikan beberapa parameter kunci untuk menganalisis pengaruhnya terhadap performa kuat tekan. Salah satu variabel yang dimodifikasi adalah rasio W/A (berat natrium silikat terhadap total berat aktivator), yang ditetapkan pada lima level berbeda, dengan variasi 0, 0,3, 0,5, 0,7 dan 1. Variasi rasio W/A ini penting karena secara langsung memengaruhi proporsi silikat dan natrium dalam larutan aktivator, yang kemudian berdampak pada viskositas dan reaktivitas campuran.

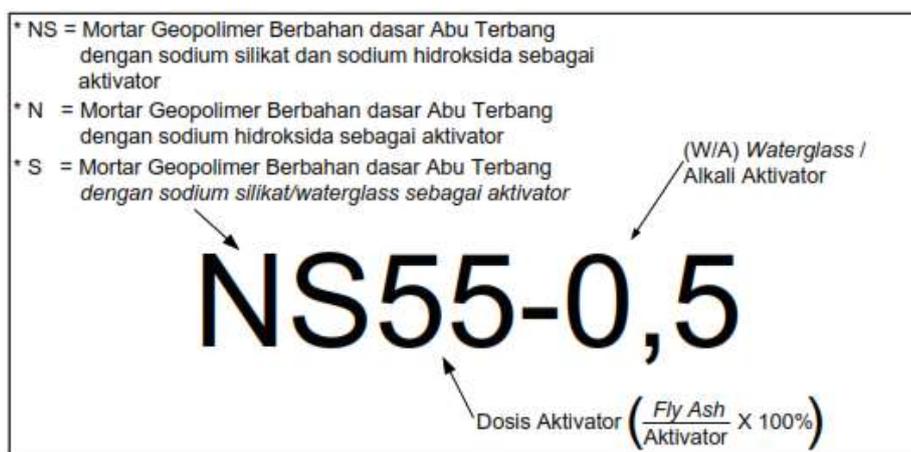
Komposisi dasar mortar distandarisasi dengan menetapkan perbandingan massa *fly ash* terhadap pasir sebesar 1:2,75, serta rasio air terhadap padatan (w/s) sebesar 0,35. Penetapan rasio tetap ini bertujuan untuk mengisolasi pengaruh dari variabel lain yang dimodifikasi.

Selanjutnya, dosis aktivator divariasikan pada tiga tingkat: 25%, 40%, dan 55% terhadap total massa *binder*. Penentuan dosis aktivator yang tepat sangat krusial, sebab ia memengaruhi konsentrasi ion hidroksil yang tersedia untuk melarutkan fase aluminosilikat dari *fly ash*, sehingga berdampak signifikan pada kinetika reaksi dan perkembangan kekuatan mortar.

Seluruh kombinasi desain campuran yang dihasilkan dari variasi parameter-parameter ini dirangkum secara detail dalam Tabel 2, dan notasi untuk setiap variasi campuran dijelaskan pada Gambar 3. Desain eksperimen ini secara komprehensif bertujuan untuk menganalisis bagaimana perubahan pada rasio W/A dan dosis aktivator memengaruhi performa kuat tekan mortar geopolimer setelah mengeras.

Tabel 2. Geopolimer *Mix* Desain (kg)

Kode Mix	<i>Fly Ash</i>	Pasir	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Air Tambahan
N25-0	0,540	1,484	0,000	0,135	0,109
NS25-0,3	0,537	1,478	0,040	0,094	0,118
NS25-0,5	0,536	1,473	0,067	0,067	0,124
NS25-0,7	0,534	1,469	0,093	0,040	0,130
S25-1	0,532	1,462	0,133	0,000	0,139
N40-0	0,532	1,463	0,000	0,213	0,060
NS40-0,3	0,528	1,453	0,063	0,148	0,074
NS40-0,5	0,526	1,446	0,105	0,105	0,084
NS40-0,7	0,523	1,439	0,147	0,063	0,094
S40-1	0,520	1,429	0,208	0,000	0,108
N55-0	0,524	1,442	0,000	0,288	0,012
NS55-0,3	0,519	1,428	0,086	0,200	0,032
NS55-0,5	0,516	1,420	0,142	0,142	0,046
NS55-0,7	0,513	1,411	0,198	0,085	0,059
S55-1	0,508	1,398	0,280	0,000	0,079



Gambar 3. Notasi Benda Uji Mortar Geopolimer

3. Prosedur Pengujian

Pengujian kuat tekan dilakukan untuk mengevaluasi performa mekanik dari setiap variasi campuran mortar geopolimer. Benda uji dicetak dalam bentuk kubus dengan dimensi 50 mm × 50 mm × 50 mm, sesuai standar pengujian mortar [11].

Campuran mortar yang telah dirancang sebelumnya dituangkan ke dalam cetakan kubus logam. Proses pemadatan dilakukan secara manual menggunakan batang baja untuk memastikan tidak adanya rongga udara dalam cetakan. Setelah permukaan diratakan, cetakan ditutup rapat setelah itu didiamkan selama 1 jam. Benda uji dipastikan pada temperatur ruang selama proses pengikatan awal.

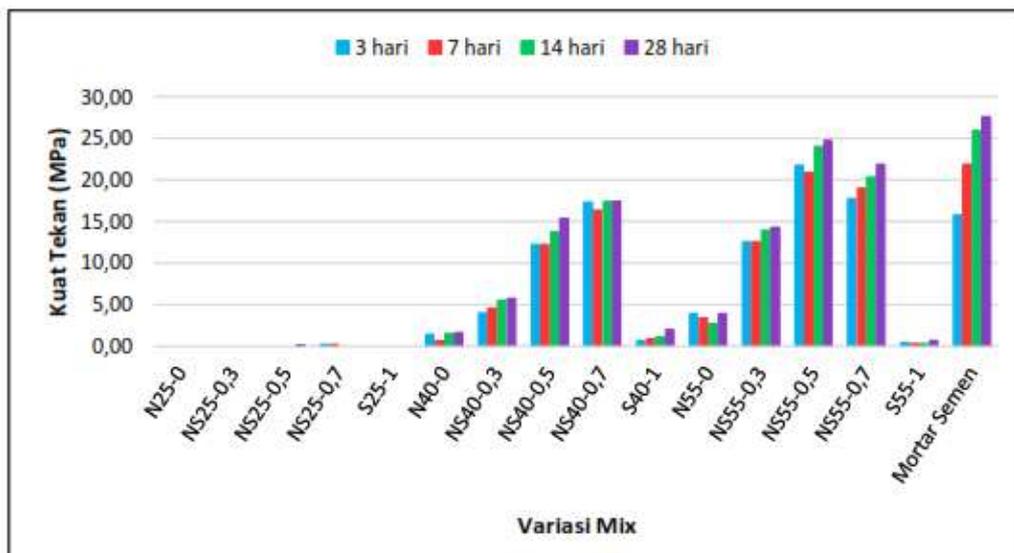
Tahap selanjutnya adalah benda uji dilepaskan dari cetakan dan segera dikondisikan dalam oven bersuhu 100°C selama 20 jam. Proses *curing* termal ini bertujuan untuk mempercepat reaksi geopolimerisasi, khususnya dalam aktivasi *fly ash* oleh larutan alkali [12]. Usai tahap *curing*, benda uji ditempatkan pada suhu ruang dalam kondisi kering sampai mencapai umur yang ditentukan untuk pengujian. Pengujian kuat tekan dilaksanakan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari dengan memakai mesin uji tekan sesuai prosedur standar pengujian mortar. Tiga benda uji digunakan pada setiap umur pengujian guna memperoleh nilai rata-rata serta meningkatkan keandalan data..

Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi dosis aktivator dan rasio W/A terhadap perkembangan kekuatan seiring waktu, serta menentukan komposisi optimum mortar geopolimer.

HASIL DAN PEMBAHASAN

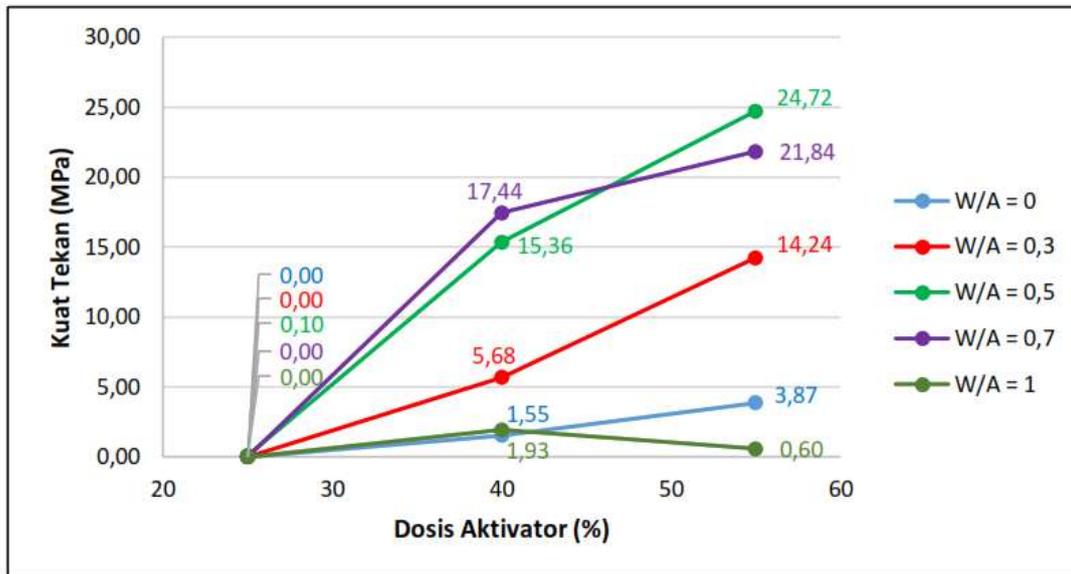
1. Pengaruh Dosis Aktivator

Pada umur 28 hari terjadi peningkatan signifikan pada kekuatan tekan mortar geopolimer seiring dengan kenaikan dosis aktivator yang dapat dilihat pada Gambar 4. Pada dosis 25%, kuat tekan maksimum hanya mencapai 0,1 MPa pada variasi W/A = 0,5. Ketika dosis dinaikkan menjadi 40%, kuat tekan meningkat mencapai 17,44 MPa pada W/A = 0,7. Terjadi peningkatan yang begitu signifikan pada dosis 55% dengan W/A = 0,5, yaitu sebesar 24,72 MPa, menunjukkan respons linier terhadap peningkatan dosis. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi dosis 55% dan W/A = 0,5 membentuk reaksi geopolimerisasi yang optimal. Namun, pada W/A = 0,7 dan dosis 55%, kuat tekan justru menurun dibandingkan dosis 40%. Penurunan ini disebabkan oleh tingginya viskositas larutan alkali akibat dominasi sodium silikat yang sangat kental, yang mengurangi *workability* dan kepadatan campuran saat pencetakan. Kondisi serupa juga diamati pada W/A = 1 Sesuai Gambar 5, di mana peningkatan dosis dari 40% menjadi 55% menyebabkan penurunan kuat tekan, menunjukkan bahwa melebihi ambang optimum aktivator, terutama dengan sodium silikat dominan, berdampak negatif terhadap kekuatan mortar.



Gambar 4. Kuat Tekan Geopolimer untuk Seluruh Variasi

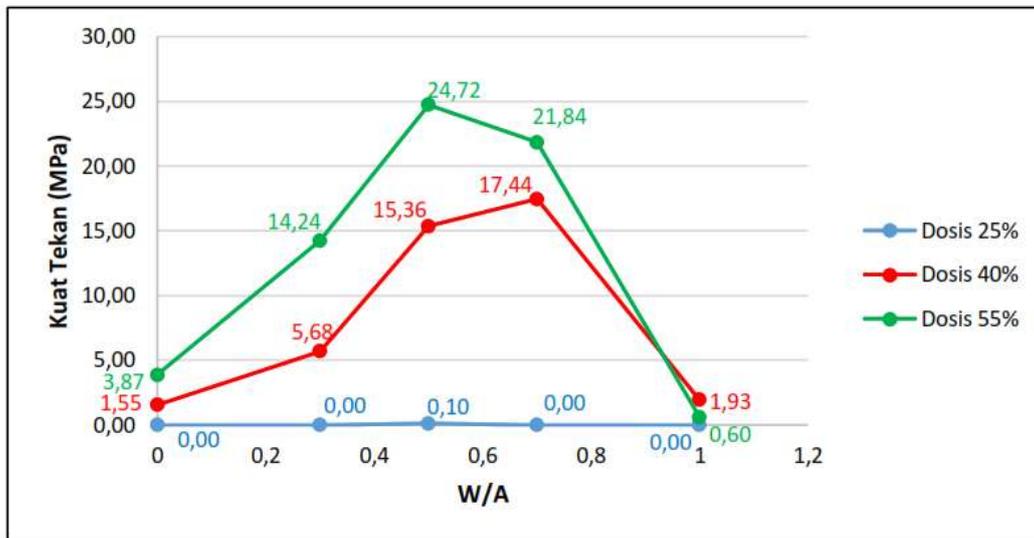
Secara umum, peningkatan dosis aktivator menaikkan kadar Na_2O dan SiO_2 dalam sistem, yang penting untuk proses pelarutan dan reaksi polimerisasi silika dan alumina dalam *fly ash*. Konsentrasi Na_2O yang rendah cenderung menghasilkan reaksi yang tidak sempurna, sehingga menurunkan kekuatan mekanik mortar geopolimer [13][14]. Namun, dosis yang terlalu tinggi juga dapat mengganggu homogenitas dan kepadatan pasta, yang justru menurunkan kekuatan akhir.



Gambar 5. Korelasi antara Kadar Aktivator dengan Kekuatan Tekan Mortar

2. Pengaruh Variasi Rasio W/A

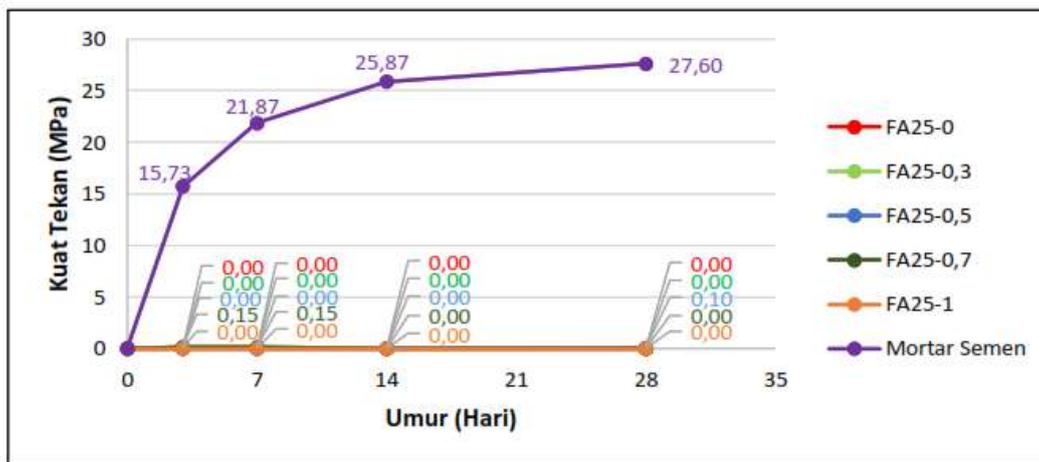
Dapat dilihat dari Gambar 6, bahwa pada umur 28 hari terjadi peningkatan kekuatan tekan pada mortar geopolimer bersamaan dengan kenaikan rasio W/A hingga mencapai nilai optimum. Pada rasio W/A = 0 (menggunakan sodium hidroksida murni), kuat tekan maksimum hanya mencapai 3,87 MPa dengan dosis aktivator 55%, sedangkan pada dosis 25% tidak terbentuk kuat tekan sama sekali (0 MPa). Peningkatan rasio W/A ke 0,3 dan 0,5 secara berturut-turut meningkatkan kuat tekan hingga 14,24 MPa dan 24,72 MPa pada dosis 55%. Namun, pada W/A = 0,7 terjadi penurunan menjadi 21,84 MPa, dan penurunan berlanjut signifikan pada W/A = 1, di mana kuat tekan hanya mencapai 1,93 MPa (dosis 40%) dan bahkan 0 MPa pada dosis 25%. Tren ini menunjukkan bahwa rasio W/A memiliki pengaruh signifikan terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Rasio W/A yang terlalu rendah atau terlalu tinggi menghasilkan kekuatan yang rendah, dengan kisaran optimum berada pada W/A = 0,5–0,7. Kenaikan rasio W/A meningkatkan kandungan sodium silikat dalam larutan aktivator, yang memperkaya kadar SiO₂. Silika aktif ini mempercepat reaksi polimerisasi unsur Si dan Al pada abu terbang yang membentuk ikatan polimer kuat. Namun, jika proporsi sodium silikat berlebihan (seperti pada W/A = 1), viskositas campuran meningkat dan distribusi pasta menjadi tidak homogen, menyebabkan berkurangnya kepadatan dan munculnya retakan mikro sehingga menurunkan kuat tekan secara drastis. Sebaliknya, pada W/A = 0, di mana hanya sodium hidroksida digunakan, reaksi polimerisasi tetap terbentuk namun hasilnya kurang optimal. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa jika hanya menggunakan sodium hidroksida, ikatan yang terbentuk memang rapat tetapi kekuatannya kurang maksimal. Sebaliknya, ikatan yang kuat akan terjadi pada saat penggunaan sodium silikat saja namun mudah muncul retakan mikro. Dari fenomena tersebut bahwa perpaduan yang seimbang antara sodium hidroksida dan sodium silikat menjadi penting dalam memperoleh kuat tekan mortar geopolimer yang optimal. [15][16].



Gambar 6. Korelasi antara W/A dengan Kekuatan Tekan Mortar

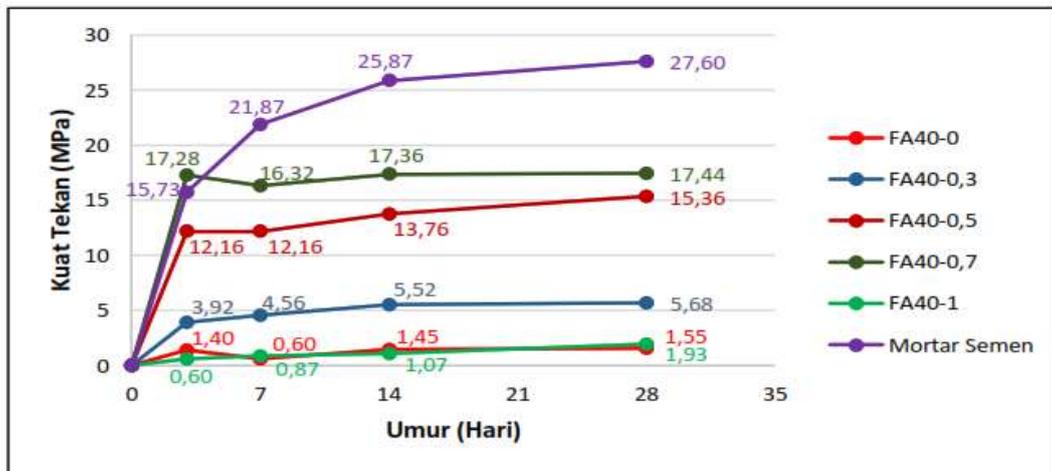
3. Hasil Uji Kuat Tekan Mortar Dosis 25%,40%, dan 55%

Hasil uji kuat tekan ditampilkan pada Gambar 7 yang membandingkan perilaku kuat tekan pada dosis aktivator sebesar 25%, 40%, dan 55%.



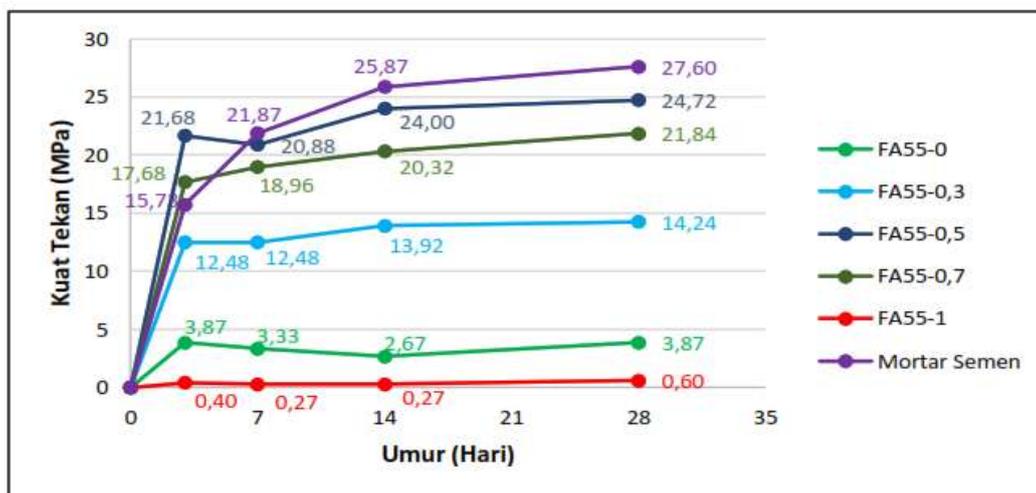
Gambar 7. Perbandingan Umur terhadap Kekuatan Tekan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer pada Dosis 25% dengan Rasio W/A = 0–1.

Berdasarkan hasil uji kuat tekan mortar geopolimer pada berbagai variasi dosis aktivator 25% pada Gambar 7 dan rasio *water to activator* (W/A) dari 0 hingga 1, diperoleh pola perkembangan kuat tekan yang mencerminkan pengaruh signifikan dari jumlah larutan aktivator terhadap efektivitas reaksi polimerisasi. Pada dosis aktivator 25%, hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan yang dihasilkan sangat rendah, bahkan mendekati nol untuk hampir semua variasi W/A. Hanya pada W/A = 0,7 yang menunjukkan peningkatan kuat tekan yang tidak begitu signifikan yaitu sebesar 0,15 MPa pada umur awal, namun kembali menurun pada umur lanjut. Hal ini mengindikasikan bahwa kandungan unsur reaktif seperti Na_2O dan SiO_2 dalam larutan aktivator masih sangat kurang, sehingga reaksi geopolimerisasi tidak berlangsung secara optimal, meskipun telah dilakukan *curing* pada suhu tinggi 100 °C selama 20 jam [10] [17].



Gambar 8. Perbandingan Umur terhadap Kekuatan Tekan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer pada Dosis 40% dan W/A = 0-1

Peningkatan performa mulai terlihat pada dosis aktivator 40% yang terilustrasi pada Gambar 8, di mana seluruh variasi W/A mulai menunjukkan pengembangan kuat tekan yang lebih baik, meskipun kenaikannya tidak signifikan. Kuat tekan tertinggi dicapai pada W/A = 0,7 sebesar 17,44 MPa. Pola pertambahan kuat tekan yang cenderung melambat atau stagnan setelah umur 3 hari menunjukkan bahwa reaksi polimerisasi sebagian besar telah selesai saat *curing* dan tidak banyak perkembangan struktur tambahan setelahnya [18].



Gambar 9. Perbandingan Umur terhadap Kekuatan Tekan Mortar Semen dan Mortar Geopolimer pada Dosis 55% dan W/A = 0-1

Puncak kinerja tercapai pada dosis aktivator 55%, di mana kuat tekan meningkat secara signifikan, terutama pada W/A = 0,5 dan 0,7 yang mencapai masing-masing 24,72 MPa dan 21,84 MPa pada umur 28 hari yang terlihat pada Gambar 9. Nilai ini sudah memenuhi kategori kekuatan yang memungkinkan mortar geopolimer digunakan sebagai elemen struktural [19], [20]. Sama seperti pada dosis 40%, laju pertambahan kuat tekan setelah umur 3 hari relatif kecil, menunjukkan bahwa sebagian besar reaksi kimia telah selesai selama proses *curing* awal.

Secara keseluruhan, dapat dianalisa bahwa penambahan dosis aktivator secara signifikan meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer, dengan dosis optimum berada pada kisaran 55%. Rasio W/A = 0,5 hingga 0,7 menunjukkan performa terbaik dalam mengoptimalkan reaksi polimerisasi dan menghasilkan kuat tekan yang memadai. Rendahnya pertumbuhan kuat tekan setelah *curing* juga menegaskan bahwa reaksi utama terjadi dalam durasi panas 20 jam pada suhu 100 °C, dan tidak banyak perkembangan lanjutan setelahnya.

SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan aktivator dari kombinasi natrium silikat dan natrium hidroksida pada mortar geopolimer mampu menghasilkan kuat tekan yang memenuhi syarat untuk aplikasi struktural. Dosis aktivator sebesar 40% dengan rasio W/A antara 0,5 hingga 0,7, serta dosis 55% dengan rasio W/A antara 0,3 hingga 0,7, menghasilkan kekuatan tekan dalam rentang 14,24 MPa sampai 24,72 MPa pada umur pengujian tertentu. Variasi ini menunjukkan bahwa dosis aktivator optimal berkisar antara 40% hingga 55%, sementara rasio W/A efektif berada dalam rentang 0,3–0,7. Sebaliknya, penggunaan tunggal sodium hidroksida atau sodium silikat sebagai aktivator tidak memberikan hasil kuat tekan yang signifikan, masing-masing hanya mencapai 3,87 MPa dan 1,93 MPa, sehingga tidak direkomendasikan untuk aplikasi struktural.

Untuk penelitian selanjutnya disarankan agar dosis aktivator dalam komposisi mortar geopolimer ditingkatkan guna mengoptimalkan kuat tekan yang dihasilkan, Selain itu, studi lanjut mengenai pengaruh rasio air terhadap bahan pengikat (w/s) dalam mortar geopolimer perlu untuk dilakukan karena parameter ini berperan penting dalam menentukan kekuatan akhir material. Pemilihan material seperti fly ash juga perlu diperhatikan; sebaiknya digunakan *fly ash* yang kering dan tidak menggumpal agar proses pencampuran lebih homogen dan hasil kuat tekan lebih maksimal. Mengingat proses pembuatan mortar atau beton geopolimer memerlukan ketelitian tinggi, maka seluruh bahan harus ditimbang secara cermat untuk menghindari kesalahan komposisi yang dapat memengaruhi kualitas produk akhir. Pendekatan yang teliti dan konsisten akan sangat membantu dalam menghasilkan material yang lebih unggul di masa mendatang.

REFERENSI

- [1] K. Behfarnia and M. Rostami, "An Assessment on Parameters Affecting The Carbonation of Alkali-Activated Slag Concrete," *J Clean Prod*, vol. 157, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.04.097.
- [2] A. Adam, "Strength and Durability Properties of Alkali Activated Slag and Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," Thesis, RMIT University, Melbourne, August, 2009.
- [3] A. A. Adam, "The Effects of Water to Solid Ratio, Activator to Binder Ratio, and Lime Proportion on the Compressive Strength of Ambient-Cured Geopolymer Concrete," *Journal of the Civil Engineering Forum*, vol. 5, no. 2, p. 161, 2019, doi: 10.22146/jcef.43878.
- [4] A. Ourgessa, A. Tasew, and R. Hafa, "The Effect of Alkaline Concentration and Curing Temperature on the Durability of Fly Ash Geopolymer Mortar," *Adv Mat Res*, vol. 1172, pp. 95–107, Jun. 2022, doi: 10.4028/p-ceit32.
- [5] R. Bharathi Murugan, S. Takkellapati, K. Kannapiran, and S. Nagan, "Geopolymer Concrete - A Green Concrete," *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, vol. 5, pp. 1738–1744, Jan. 2012.
- [6] S. Qaidi *et al.*, "Fly Ash-Based Geopolymer Composites: A Review of the Compressive Strength and Microstructure Analysis," *Materials*, vol. 15, no. 20, 2022, doi: 10.3390/ma15207098.

- [7] P. Nath and P. K. Sarker, "Effect of GGBFS on Setting, Workability and Early Strength Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Cured in Ambient Sondition," *Constr Build Mater*, vol. 66, pp. 163–171, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>.
- [8] M. Alhawat, A. Ashour, G. Yildirim, A. Aldemir, and M. Sahmaran, "Properties of Geopolymers Sourced from Construction and Demolition Waste: A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 50, p. 104104, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104104>.
- [9] M. Nasir, A. H. Mahmood, and A. A. Bahraq, "History, Recent Progress, and Future Challenges of Alkali-Activated Binders – An overview," *Constr Build Mater*, vol. 426, p. 136141, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136141>.
- [10] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V Rangan, "Introducing Fly Ash-based Geopolymer Concrete: Manufacture and Engineering Properties," *30 th Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES*, no. January 2005, pp. 23–24, 2005, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/43649846>
- [11] ASTM C109 / C109M, *The standard's title, such as "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars."* West Conshohocken, PA 19428-2959, United States: ASTM International, 2016. doi: 10.1520/C0109_C0109M-20.
- [12] A. Rajarajeswari and G. Dhinakaran, "Compressive Strength of GGBFS Based GPC under Thermal Curing," *Constr Build Mater*, vol. 126, pp. 552–559, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.076>.
- [13] M. Morsy, S. Alsayed, Y. Al-Salloum, and T. Almusallam, "Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder," *Arab J Sci Eng*, vol. 39, pp. 4333–4339, Jun. 2014, doi: 10.1007/s13369-014-1093-8.
- [14] Y. Zuo, M. Nedeljković, and G. Ye, "Pore solution composition of alkali-activated slag/fly ash pastes," *Cem Concr Res*, vol. 115, pp. 230–250, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.10.010.
- [15] M. Felix Wijaya, M. Olivia*, and E. Saputra, "Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid menggunakan Semen Portland," *Jurnal Teknik*, vol. 13, no. 1, pp. 60–68, 2019, doi: 10.31849/teknik.v13i1.2914.
- [16] R. Tänzer, Y. Jin, and D. Stephan, "Effect of The Inherent Alkalis of Alkali Activated Slag on The Risk of Alkali Silica Reaction," *Cem Concr Res*, vol. 98, no. April, pp. 82–90, 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.04.009.
- [17] D. A. Syaputra, F. R. Nugroho, H. Ay Lie, and Purwanto, "Studi Experimental Pengaruh Perbedaan Molaritas Aktivator Pada Perilaku Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash," *Jurnal Karya Teknik Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 89–98, 2018.
- [18] M. Olivia and H. Nikraz, "Properties of Fly Ash Geopolymer Concrete Designed by Taguchi Method," *Materials & Design (1980-2015)*, vol. 36, pp. 191–198, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.10.036>.
- [19] B. Oktaviastuti, G. Pandulu, and E. Lusyana, "Kuat Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Alternatif Perkerasan Kaku di Daerah Pesisir," *Reka Buana : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Teknik Kimia*, vol. 6, pp. 78–87, Mar. 2021, doi: 10.33366/rekabuana.v6i1.2271.
- [20] I. Loekito and A. Wardhono, "Pengaruh Variasi NaOH Dan Na₂SiO₃ Terhadap Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar pada Kondisi Rasio Fly Ash Terhadap Aktivator 2,5 : 1," *Jurnal REKATS : Rekayasa Teknik Sipil*, vol.7 no.1, Jan 2019.