



## SIFAT FISIK DAN MEKANIK MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR KAPUR KERANG DAN ABU TERBANG

Jauhar Fajrin<sup>\*1</sup>, Muhammad Andhika Al Fattaah<sup>\*2</sup>, Hariyadi<sup>\*3</sup>  
I Wayan Sugiarta<sup>\*4</sup>, Pahurahman<sup>\*5</sup>

<sup>\*1</sup>Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram

E-mail: <sup>\*1</sup>[abc0507@gmail.com](mailto:abc0507@gmail.com)

### ABSTRACT

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kapur dapat digunakan sebagai geopolimer dengan kinerja mekanis dan daya tarik yang lebih baik daripada semen Portland biasa, meskipun mungkin perlu diaktifkan secara termal untuk meningkatkan reaktivitasnya. Demikian pula dengan penggunaan kapur kerang bakar dalam formulasi geopolimer dapat meningkatkan sifat mekanik dan ketahanan terhadap zat kimia. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan karakterisasi sifat fisik dan mekanik mortar geopolimer berbahan dasar kapur kerang dan abu terbang. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah uji berat volume, serapan air dan uji kuat tekan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa: 1) Nilai rerata berat volume mortar geopolimer dengan berbagai variasi komposisi campuran mempunyai nilai yang hampir mirip dengan kisaran antara 1,94 gr/cm<sup>3</sup> sampai dengan 2,03 gr/cm<sup>3</sup>, atau 1940-2030 kg/m<sup>3</sup>. 2) Mortar geopolimer dengan material precursor dari kapur kerang saja, yakni komposisi SA-K, mempunyai daya serap air paling rendah yakni hanya 0,06 %. Hal ini menunjukkan matriks mortar yang sangat padat saat menggunakan kapur kerang murni. Pengkombinasi dengan *fly ash* meningkatkan peluang serapan air yang lebih tinggi. 3) Pengkombinasi kapur kerang dengan *fly ash* sebagai precursor material memberikan efek yang sangat signifikan dalam meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer. 4) Kombinasi kapur kerang dan *fly ash* sebagai precursor material pada mortar geopolimer mempunyai peluang yang besar untuk diaplikasikan sebagai bahan bangunan dalam dunia kontruksi sipil.

### Keyword

Geopolimer,  
Kapur Kerang,  
Fly Ash,  
Percursor Material

## 1. PENDAHULUAN

Penelitian dan pengembangan geopolimer telah dilakukan oleh banyak pihak, mulai dari tahapan dasar (hulu) sampai ke pembuatan produk (hilir). Telah banyak hasil-hasil yang dilaporkan terkait dengan material geopolimer ini. Geopolimer memiliki karakteristik mekanik dan fisik yang sangat baik, serta stabilitas termal dan kimia yang tinggi dalam kondisi lingkungan yang agresif (Jiang dkk., 2020). Beberapa temuan dari penelitian sebelumnya mengindikasikan bahwa komposisi material dasar (*pre-cursor material*) dan proporsi bahan kimia pelarut (*Alkali solution*) berpengaruh signifikan terhadap karakteristik geopolimer yang dihasilkan. Temuan lain adalah proses perawatan (curing) juga sangat signifikan pengaruhnya, dimana penggunaan temperatur memainkan peran yang krusial dalam menentukan kualitas geopolimer yang dihasilkan. Penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Hartono dkk. (2022) menunjukkan bahwa curing pada suhu tinggi (oven) dapat mempercepat reaksi geopolimerisasi dan meningkatkan kekuatan awal material. Di sisi lain, curing pada suhu ruangan lebih praktis dan ekonomis untuk aplikasi skala besar, namun mungkin memerlukan waktu lebih lama untuk mencapai kekuatan optimal.

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kapur dapat digunakan sebagai geopolimer dengan kinerja mekanis dan daya tarik yang lebih baik daripada semen Portland biasa, meskipun mungkin perlu diaktifkan secara termal untuk meningkatkan reaktivitasnya. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan karakterisasi sifat fisik dan mekanik mortar geopolimer berbahan dasar kapur kerang dan abu terbang.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Geopolimer adalah material berbasis aluminosilikat yang digunakan sebagai alternatif pengganti semen Portland. Penggunaannya dalam konstruksi modern semakin berkembang karena sifat mekanis yang baik, ketahanan terhadap suhu tinggi, dan dampak lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan semen konvensional. Batu kapur ( $\text{CaCO}_3$ ), yang umumnya digunakan dalam produksi semen Portland, mulai dieksplorasi sebagai bahan tambahan atau substitusi dalam sistem geopolimer untuk meningkatkan karakteristik tertentu. Geopolimer adalah hasil reaksi polimerisasi antara sumber silika-alumina dengan aktivator alkali, seperti natrium hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) dan natrium silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ). Menurut Davidovits (2020), geopolimer memiliki struktur tiga dimensi yang stabil dan tahan terhadap lingkungan ekstrem. Batu kapur (limestone) mengandung kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dengan sedikit kandungan magnesium karbonat ( $\text{MgCO}_3$ ), silika ( $\text{SiO}_2$ ), dan oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Batu kapur sering digunakan dalam industri semen sebagai sumber CaO setelah dikalsinasi pada suhu tinggi ( $\sim 900^\circ\text{C}$ ). Menurut penelitian oleh Guerrieri & Sanjayan (2010), campuran geopolimer berbasis slag dengan tambahan batu kapur menunjukkan peningkatan kekuatan tekan hingga 30% lebih tinggi dibandingkan geopolimer tanpa batu kapur. Selanjutnya Liew dkk. (2016) melaporkan bahwa penggunaan 10–20% batu kapur dalam geopolimer berbasis fly ash dapat meningkatkan kekuatan awal (*early strength*) karena reaksi kalsium dalam sistem alkali. Penelitian lain, Ismail dkk. (2014) menemukan bahwa batu kapur meningkatkan stabilitas geopolimer terhadap suhu tinggi ( $>600^\circ\text{C}$ ) karena pembentukan fase tambahan seperti *anorthite* dan *gehlenite*. Selanjutnya, Rozi dkk. (2020) melakukan penelitian tentang sifat mekanik beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* PLTU Pangkalan Susu. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan kandungan senyawa kimia dan sifat mekanik beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dari PLTU Pangkalan Susu dengan larutan alkalin 8M dan perbandingan agregat terhadap binder 70%:30%. Variasi benda uji yang digunakan untuk melakukan pengujian sifat mekanik dalam penelitian ini adalah variasi waktu perawatan (*Curing time*). Pengujian sifat fisik benda uji dilakukan pada umur 7, 14 dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *fly ash* PLTU Pangkalan Susu merupakan *fly ash* kelas C dengan kandungan 34,81%  $\text{SiO}_2$ , 25,39%  $\text{CaO}$ , 14,92%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 16,49%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dan 4,92%  $\text{MgO}$ , dengan total kandungan  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , dan  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  sebesar 66,22%. *Fly ash* kelas C ini sesuai

digunakan sebagai campuran beton geopolimer menurut ASTM-C618. Kuat tekan beton geopolimer setelah 28 hari adalah 28,5 MPa dan kuat tariknya 6,83 MPa. Kesimpulannya, beton geopolimer ini layak digunakan dalam aplikasi konstruksi, dan penggunaan *fly ash* dari PLTU Pangkalan Susu sebagai pengganti semen dapat mengurangi pencemaran lingkungan serta limbah industry.

Sebuah penelitian mengenai komparasi kuat tekan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan metode curing oven dan suhu ruang dilaporkan oleh Hartono dkk., (2022). Penelitian ini mengkaji beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dari pembakaran batubara di PLTU Tanjung Jati, Kabupaten Jepara, menggunakan *fly ash* tipe F dan alkali aktivator berupa sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat ( $Na_2SiO_3$ ) dengan molaritas 10M. Tujuan penelitian adalah membandingkan kuat tekan maksimum binder geopolimer dan beton geopolimer pada umur 28 hari dengan dua metode perawatan, yaitu suhu ruangan dan oven pada 60°C selama 24 jam. Pengujian melibatkan uji material *fly ash* menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), uji slump, serta uji kuat tekan untuk binder dan beton geopolimer dengan perbandingan aktivator 1:2 dan 1:3. Hasil menunjukkan bahwa variasi binder 10-3CR (curing oven 60°C) dengan rasio NaOH terhadap  $Na_2SiO_3$  sebesar 1:3 memberikan kuat tekan maksimum binder 37,48 MPa dan beton 60,09 MPa pada umur 28 hari. Analisis menyimpulkan bahwa curing pada 60°C selama 24 jam mempercepat hidrasi dan polimerisasi, menghasilkan kuat tekan beton geopolimer yang lebih tinggi, namun suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan penurunan kualitas akibat penguapan air. Dilaporkan juga sebuah penelitian tentang pengaruh pemanasan terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Dalam penelitian ini, metode pemanasan pada suhu 60°C digunakan dengan variasi durasi pemanasan selama 3, 6, 18, dan 24 jam. Mortar geopolimer berukuran 5 x 5 x 5 cm yang digunakan berbahan dasar *fly ash* tipe C dengan rasio air padatan sebesar 0,35. Molaritas larutan yang digunakan adalah 12 M dan 14 M dengan perbandingan  $Na_2SiO_3$  sebesar 1,5:1. Uji yang dilakukan adalah uji kuat tekan.

Hasil menunjukkan bahwa kuat tekan maksimum mortar geopolimer dengan molaritas 12 M pada usia 28 hari dicapai setelah pemanasan selama 24 jam pada suhu 60°C, yaitu sebesar 59,86 MPa. Sedangkan untuk mortar geopolimer dengan molaritas 14 M, kuat tekan maksimum tercapai setelah pemanasan selama 3 jam pada suhu 60°C, yaitu sebesar 63,66 MPa. Durasi pemanasan yang paling optimal dari penelitian ini adalah 7 jam 12 menit. (Kurniawan dan Mokhtar, 2021).

### 3. METODELOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara eksperimental di Laboratorium Fakultas Teknik, Universitas Mataram. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah uji berat volume, serapan air dan uji kuat tekan. Adapun benda uji yang digunakan dalam penelitian ini berupa kubus dengan ukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui potensi pembuatan mortar geopolimer dalam hal sifat fisik dan mekanik geopolimer berbahan dasar kapur kerang dengan kombinasi bahan lain termasuk *fly ash* dari PLTU Jeranjang, Lombok Barat. Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 1.



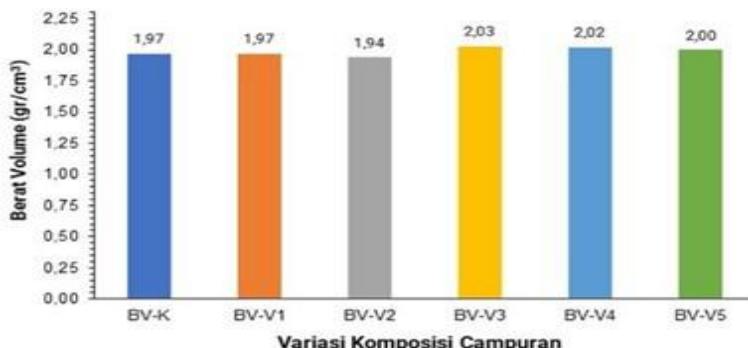
Gambar 1. Peralatan yang digunakan dalam penelitian

Pada penelitian ini, digunakan rasio antara aktivator : agregat halus : pre-kursor sebesar 0,30 : 0,35 : 0,35. Dengan total berat campuran sebesar 300 gr, maka masing-masing komponen terdiri dari 90 gr aktivator, 105 gr agregat halus, dan 105 gr material pre-kursor. Rasio antara Sodium Silikat ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) dan Sodium Hidroksida ( $\text{NaOH}$ ) yang digunakan adalah 2,5 : 1, sehingga dari 90 gr aktivator terdiri atas 64,29 gr  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  dan 25,71 gram  $\text{NaOH}$ . Selanjutnya, komposisi material pre-kursor divariasikan menjadi enam komposisi berbeda, dan sebagai pembanding digunakan mortar dengan precursor kapur kerang tanpa campuran fly ash.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengujian Berat Volume (BV) Mortar

Berat volume (BV) geopolimer bervariasi tergantung pada berbagai faktor seperti komposisi campuran dan kondisi pemrosesan. Berat volume geopolimer juga dapat dipengaruhi oleh jenis prekursor yang digunakan. secara umum, berat volume geopolimer berbasis fly ash berkisar antara 1800 kg/m<sup>3</sup> hingga 2200 kg/m<sup>3</sup>, atau antara 1,8 g/cm<sup>3</sup> hingga 2,2 g/cm<sup>3</sup> (Hardjito dan Rangan, 2005). Sementara geopolimer berbasis metakaolin berkisar antara 1,6 g/cm<sup>3</sup> hingga 2,0 g/cm<sup>3</sup> (Duxon dkk., 2007). Penting untuk dicatat bahwa berat volume adalah salah satu sifat penting dari beton geopolimer. Pemahaman tentang berbagai faktor yang mempengaruhi berat volume geopolimer memungkinkan untuk mengoptimalkan campuran dan proses pembuatan untuk mencapai sifat yang diinginkan untuk berbagai aplikasi. Hasil pengujian berat volume mortar dalam penelitian ini ditampilkan Gambar 2.



Gambar 2. Berat volume mortar geopolimer berdasarkan komposisi campuran fly ash/kapur kerang

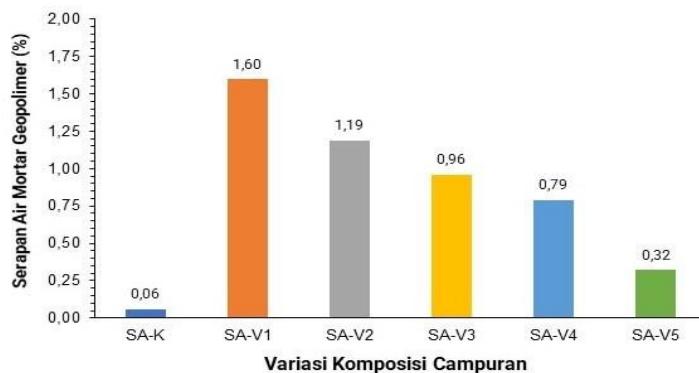
Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2, secara umum terlihat bahwa nilai rerata berat volume mortar geopolimer dengan berbagai variasi komposisi campuran mempunyai nilai yang hampir mirip dengan kisaran antara 1,94 gr/cm<sup>3</sup> sampai dengan 2,03 gr/cm<sup>3</sup>, atau 1940-2030 kg/m<sup>3</sup>. Nilai rerata berat volume terkecil tercatat pada variasi campuran BV-V2 dengan komposisi 60% FA : 40% K, yaitu sebesar 1,94 g/cm<sup>3</sup>. Nilai rendah ini mengindikasikan bahwa tingginya proporsi fly ash, sebagai material pozzolanik ringan, cenderung menurunkan kerapatan total mortar. Berat volume tertinggi tercatat pada komposisi BV-V3 (50% FA : 50% K), dengan nilai rerata berat volume sebesar 2,03 g/cm<sup>3</sup>. Perbedaan antara nilai tertinggi (2,03 g/cm<sup>3</sup>) dan terendah (1,94 g/cm<sup>3</sup>) tidak terlalu signifikan, yakni hanya sebesar 4,64%.

Terlihat dengan jelas pula bahwa ketika proporsi kapur kerang lebih banyak, maka berat volume lebih kecil dibandingkan. Hal ini terlihat pada variasi komposisi BV-K, BV-V1 dan BV-V2. Ketika proporsi fly ash ditingkatkan, maka berat volume mortar geopolimer pun mulai meningkat pula, seperti yang terlihat pada variasi komposisi BV-V3, BV-V4 dan BV-V5. Hasil ini mengindikasikan bahwa semua nilai rerata berat volume untuk semua komposisi yang diuji, sesuai dengan hasil pengujian yang dilaporkan oleh Hardjito dan Rangan (2005) maupun Duxon dkk., (2007). Hal ini mengindikasikan bahwa geopolimer dengan bahan dasar fly ash

yang dikombinasikan dengan kapur kerang mempunyai potensi yang besar untuk diaplikasikan lebih lanjut, khususnya dalam dunia konstruksi.

#### 4.2. Pengujian serapan air (SA) mortar

Pengujian serapan air (SA) atau daya serap air pada mortar bertujuan untuk mengetahui kemampuan mortar menyerap air, yang penting untuk mengetahui ketahanan mortar terhadap cuaca dan kelembaban. Pengujian ini biasanya dilakukan pada benda uji mortar yang telah berumur tertentu (misalnya 28 hari). Daya serap air mortar geopolimer sangat dipengaruhi oleh jenis bahan (*fly ash*, slag, metakaolin), rasio aktivator, dan curing. Namun secara umum, mortar geopolimer memiliki daya serap air yang lebih rendah dibanding mortar semen portland karena mikrostruktur yang lebih rapat dan tidak kapiler aktif (tidak mengandung  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Olivia dan Nikraz (2012) menyatakan bahwa serapan air geopolimer berbasis *fly ash* berkisar 4-8%. Sementara Duxson dkk. (2007) melaporkan bahwa serapan air geopolimer berbasis metakaolin berkisar antara 6-10%. Sementara serapan air pada mortar portland biasa berkisar antara 5-10% (Neville, 2011). Hasil pengujian serapan air mortar geopolimer berbasis *fly ash*/kapur kerang ditampilkan pada Gambar 3, untuk memberikan ilustrasi yang lebih jelas.



Gambar 3. Serapan air (SA) mortar geopolimer berdasarkan komposisi campuran fly ash/kapur kerang

Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3, pada komposisi SA-K dengan komposisi 100 % K : 0 % FA mencatat serapan air terendah, yakni hanya 0,06 %. Hal ini menunjukkan matriks mortar yang sangat padat saat menggunakan kapur kerang murni. Sebaliknya, pada variasi SA-V1 dengan komposisi campuran 70 % FA:30 % K menghasilkan serapan air tertinggi sebesar 1,60 %, menandakan porositas yang meningkat seiring proporsi *fly ash* yang besar. Pola ini memperlihatkan hubungan non linier antara komposisi FA-K dan serapan air: Peningkatan *fly ash* hingga 70 % memunculkan porositas maksimum, sedangkan pengurangan *fly ash* menurunkan serap hingga mendekati nilai mortar kapur kerang murni. Dengan demikian, proporsi *fly ash* menjadi parameter kunci dalam mengendalikan daya serap air mortar geopolimer.

Selain itu, hal ini juga membuktikan teori bahwa penambahan kapur kerang murni ( $\text{CaCO}_3$ ) secara efektif mengisi rongga mikro dalam matriks mortar sehingga meningkatkan kepadatan secara signifikan. Penelitian menunjukkan bahwa  $\text{CaCO}_3$  berfungsi sebagai filler yang menempati ruang-ruang kosong antar partikel, terutama pori halus, sehingga mengurangi volume pori terbuka yang bisa menyerap air. Dengan demikian, struktur mortar menjadi lebih padat dan serapan airnya menjadi sangat rendah seperti pada variasi SA-K. Satu hal yang menarik dari penggunaan kapur sebagai bahan precursor geopolimer ini adalah serapan air yang sangat rendah, jauh dibawah serapan air geopolimer berbasis *fly ash* yang diteliti oleh Olivia dan Nikraz (2012) yang berada pada kisaran 4-8%. Atau jauh lebih rendah dibandingkan dengan hasil temuan Duxson dkk. (2007) yang melaporkan bahwa serapan air geopolimer berbasis metakaolin berkisar antara 6-10%. Hasil ini juga mengindikasikan bahwa serapan air

mortar geopolimer kombinasi *fly ash* dan kapur kerang berada jauh dibawah serapan air pada mortar portland biasa yang berada pada kisaran 5-10% (Neville, 2011).

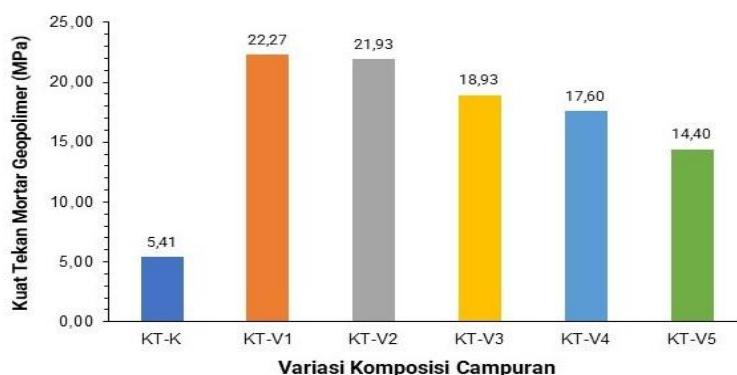
#### 4.3. Karakterisasi Sifat Mekanika Mortar

Sifat mekanik bahan adalah karakteristik material yang menggambarkan bagaimana material tersebut merespons gaya atau beban eksternal. Sifat-sifat ini penting dalam berbagai bidang seperti rekayasa, konstruksi, dan manufaktur untuk memastikan keamanan dan keandalan suatu produk. Kemampuan material untuk menahan beban atau gaya tanpa mengalami kerusakan atau patah disebut dengan kekuatan (*strength*) dalam satuan MPa. Salah satu karakteristik yang paling penting dari mortar, termasuk mortar geopolimer, adalah kekuatan tekan nya.

Pada penelitian ini, sifat mekanika geopolimer hanya ditinjau dari kuat tekan (TK) nya. Kuat tekan adalah kemampuan suatu material atau struktur untuk menahan beban yang cenderung membuatnya mengecil (terkompresi). Dalam konteks konstruksi, kuat tekan beton adalah kemampuan beton untuk menahan gaya tekan per satuan luas hingga mencapai titik hancur.

Rerata kuat tekan mortar geopolimer bervariasi tergantung pada banyak faktor seperti jenis bahan baku (*fly ash*, slag, metakaolin, dll.), komposisi aktivator alkali (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>), rasio air/semennya, curing (suhu dan waktu), serta umur pengujian. Namun, berdasarkan berbagai studi, rerata kuat tekan mortar geopolimer umumnya berada pada kisaran 20 – 60 MPa. Olivia dkk. (2008) menyatakan bahwa kuat tekan mortar geopolimer berkisar antara 20–40 MPa. Sementara Davidovits (2020) melaporkan bahwa kuat tekan mortar geopolimer berkisar antara 35–60 MPa.

Hasil pengujian kuat tekan (TK) mortar geopolimer berbasis *fly ash*/kapur kerang ditampilkan Gambar 4, untuk memberikan ilustrasi yang lebih jelas.



Gambar 4. Kuat tekan (KT) mortar geopolimer berdasarkan komposisi campuran *fly ash*/kapur kerang

Secara umum terlihat bahwa pengkombinasian kapur kerang dengan *fly ash* sebagai precursor material memberikan efek yang sangat signifikan terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Mortar geopolimer yang hanya menggunakan kapur sebagai material precursor hanya memiliki rerata kuat tekan sebesar 5,41 MPa. Tetapi ketika dikombinasi dengan *fly ash* sebesar 30%, maka kuat tekan langsung melonjak sampai 22,27 MPa, atau mengalami peningkatan sebesar 311.64%. Penambahan proporsi *fly ash* pada persentase yang lebih banyak mulai mengurangi nilai kuat tekan, tetapi penurunan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Perbedaan antara mortar geopolimer dengan kombinasi kapur kerang dan *fly ash* terendah (KT-V5) adalah sebesar 5,41 MPa dan 14,40 MPa, dimana perbedaan keduanya adalah sebesar 160.81%.

Gambar 4 juga memperlihatkan bawa kuat tekan tertinggi dicapai pada komposisi abu terbang 70% – kapur kerang 30%, atau pada variasi KT-VA, sebesar 22,27 MPa. Sementara

terendah (5,41 MPa) diperoleh pada variasi KT-K dengan komposisi 0% FA – 100% K (murni kapur kerang). Trend data menunjukkan bahwa kekuatan menurun seiring semakin berkurangnya proporsi *fly ash*. Hal ini konsisten dengan temuan yang dilaporkan oleh Restu dkk. bahwa pengikat 100% cangkang kerang belum efektif menghasilkan kuat tekan tinggi. Komposisi kapur kerang murni menjelaskan rendahnya kekuatan: cangkang kerang terutama mengandung CaO (~97,6%) dan hanya ≈1,12% SiO<sub>2</sub> serta 0,29% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Dengan kandungan silika-alumina yang sangat minim, cangkang kerang saja hampir tidak dapat bergeopolimerisasi meskipun diaktifkan alkali. Sodium hidroksida dalam larutan aktivator bekerja mereaksikan silika dan alumina dari abu terbang untuk membentuk ikatan –Si–O–Al– yang kuat, tetapi jika silika-alumina tidak tersedia (seperti pada 100% cangkang), reaksi ini sangat terbatas. Oleh karena itu, matriks pengikat yang dihasilkan lemah dan berpori, menghasilkan kuat tekan rendah. Penelitian juga menunjukkan bahwa kekuatan 100% serbuk cangkang memang “masih rendah” meski meningkat seiring waktu pengerasan, menegaskan bahwa perlu adanya sumber silikat-aluminat untuk kekuatan optimal.

Sementara itu, penambahan *fly ash* secara dramatis meningkatkan kekuatan karena sifat pozzolanik dan reaktivitas silika-alumina-nya. *Fly ash* kaya silika dan alumina yang bereaksi dalam larutan NaOH/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> membentuk gel aluminosilikat amorf (N-A-S-H) sebagai fase pengikat utama. Sodium hidroksida berperan melarutkan silika dan alumina dari *fly ash* sehingga terbentuk ikatan polimer –Si–O–Al– yang kokoh. Dengan kenaikan kadar FA, semakin banyak gel geopolimer yang terbentuk, mengisi pori lebih baik dan memadatkan struktur material. Di sisi lain, kalsium dari kapur kerang juga berperan: sebagai tambahan, Ca dapat membentuk gel C–S–H (atau C–A–S–H) yang mengisi rongga dalam matriks, mereduksi porositas dan menambah kekuatan tekan. Namun apabila proporsi FA terlalu kecil, jumlah silika-alumina tidak mencukupi untuk membangun struktur geopolimer utama, sehingga kekuatan tekan menurun drastis. Dengan demikian, *fly ash* berperan penting sebagai sumber pozzolan siliko-aluminat untuk reaksi geopolimerisasi – ketidakcukupan *fly ash* (atau kelebihan Ca tanpa silika) menghasilkan sistem pengikat yang lemah, sedangkan rasio FA yang optimal (sekitar 60–70%) memberikan struktur geopolimer padat dengan kekuatan tekan tertinggi.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian adalah sebagai berikut:

- 1) Nilai rerata berat volume mortar geopolimer dengan berbagai variasi komposisi campuran mempunyai nilai yang hampir mirip dengan kisaran antara 1,94 gr/cm<sup>3</sup> sampai dengan 2,03 gr/cm<sup>3</sup>, atau 1940-2030 kg/m<sup>3</sup>. Nilai rerata berat volume terkecil tercatat pada variasi campuran BV-V2 dengan komposisi 60% FA : 40% K, yaitu sebesar 1,94 g/cm<sup>3</sup>. Nilai rendah ini mengindikasikan bahwa tingginya proporsi *fly ash*, sebagai material pozzolanik ringan, cenderung menurunkan kerapatan total mortar. Berat volume tertinggi tercatat pada komposisi BV-V3 (50% FA : 50% K), dengan nilai rerata berat volume sebesar 2,03 g/cm<sup>3</sup>. Perbedaan antara nilai tertinggi (2,03 g/cm<sup>3</sup>) dan terendah (1,94 g/cm<sup>3</sup>) tidak terlalu signifikan, yakni hanya sebesar 4,64%.
- 2) Mortar geopolimer dengan material precursor dari kapur kerang saja, yakni komposisi SA-K, mempunyai daya serap air paling rendah yakni hanya 0,06 %. Hal ini menunjukkan matriks mortar yang sangat padat saat menggunakan kapur kerang murni. Pengkombinasi dengan *fly ash* meningkatkan peluang serapan air yang lebih tinggi, dimana pada variasi SA-V1 dengan komposisi campuran 70 % FA:30 % K menghasilkan serapan air tertinggi sebesar 1,60 %, yang mengindikasikan bahwa porositas yang meningkat seiring meningkatnya proporsi *fly ash*. Dengan demikian, proporsi *fly ash* menjadi parameter kunci dalam mengendalikan daya serap air mortar geopolimer.

- 3) Pengkombinasi kapur kerang dengan *fly ash* sebagai precursor material memberikan efek yang sangat signifikan terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Mortar geopolimer yang hanya menggunakan kapur sebagai material precursor hanya memiliki rerata kuat tekan sebesar 5,41 MPa. Tetapi ketika dikombinasi dengan *fly ash* sebesar 30%, maka kuat tekan rerata langsung melonjak sampai 22,27 MPa, atau mengalami peningkatan sebesar 311.64%. Penambahan proporsi *fly ash* pada persentase yang lebih banyak mulai mengurangi rerata nilai kuat tekan, tetapi penurunan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Perbedaan antara mortar geopolimer dengan kombinasi kapur kerang dan *fly ash* terendah (KT-V5) adalah sebesar 5,41 MPa dan 14,40 MPa, dimana perbedaan keduanya adalah sebesar 160.81%.
- 4) Kombinasi kapur kerang dan *fly ash* sebagai precursor material pada mortar geopolimer mempunyai peluang yang besar untuk diaplikasikan sebagai bahan bangunan dalam dunia kontruksi sipil.

### Saran

Beberapa saran yang direkomendasikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Perlu dipastikan bahwa pencampuran alkali aktivator perlu dilakukan sehari sebelum pembuatan benda uji untuk memaksimalkan reaksi dalam aktivator.
- 2) Perlu penelitian lebih lanjut dengan membedakan komposisi campuran binder, baik itu dari segi perbandingan *fly ash* dengan aktivator maupun variasi kadar molaritas dari aktivatornya untuk mendapatkan komposisi campuran terbaik.

### REFERENSI

- Davidovits J., (2020). Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition. In J. Davidovits.– Saint-Quentin, France (Vol. 5, Issue April). [https://www.researchgate.net/publication/265076752\\_Geopolymer\\_Chemistry\\_and\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/265076752_Geopolymer_Chemistry_and_Applications).
- Duxson P., Fernández-Jiménez A., Provis J. L., Lukey G. C., Palomo A., van Deventer J. S. J, (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.
- Guerrieri M., Sanjayan J.G., (2010). Behavior of Limestone-Fly Ash Geopolymers under Compression. *Cement and Concrete Composites*, 32(4), 271-279.
- Hartono J., Fitria L. L., Budi A., Teguh H., (2022). Komparasi Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly ash Dengan Metode Curing Oven dan Suhu Ruang. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 12(2), 383. <https://doi.org/10.29103/tj.v12i2.714>
- Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y., & Huang, B., (2020), A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures, *Journal of Cleaner Production*, Volume 270.
- Kurniawan B., Mokhtar A., (2021). Pengaruh Pemanasan Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolymer. *Seminar Keinsinyuran Program Studi Program Profesi Insinyur*, 1(1), 14–22. <https://doi.org/10.22219/skpsspi.v1i0.4165>
- Neville A. M., (2011), *Properties of Concrete*, 5th Edition, Pearson Education Limited

Olivia M., Nikraz H., (2012). Properties of fly ash geopolymers concrete designed by Taguchi method. Materials and Design, 36, 191–198.

Rozi M. F., Tarigan J., Perwira A., (2020). Analisis Sifat Mekanik Beton Geopolymer Berbahan Dasar Fly ash PLTU Pangkalan Susu. Jurnal Health Sains, 1(5), 567–579. <https://doi.org/10.46799/jsa.v1i5.82>.