

**ANALISIS PERBANDINGAN VARIASI AGREGAT HALUS PADA KUAT TEKAN,
ABSORPSI, DAN DENSITAS MORTAR GEOPOLIMER DENGAN
PERBANDINGAN 1 : 3,5 DAN 1 : 4,25**

Muhammad Fajri Al Fatah; Mochamad Solikin
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Penggunaan semen Portland sebagai bahan pengikat utama pada mortar memberikan kontribusi yang sangat besar terhadap emisi karbon dioksida (CO_2), sehingga diperlukan material alternatif yang lebih ramah lingkungan. Salah satu alternatif tersebut adalah mortar geopolimer yang memanfaatkan *fly ash* sebagai bahan pengikat dengan aktivator alkali berupa Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3). Karakteristik mortar geopolimer dipengaruhi oleh komposisi campuran, sehingga diperlukan pengujian sifat mekanik dan fisik untuk mengetahui kinerjanya sebagai pengganti mortar.

Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis pengaruh variasi penggunaan *fly ash* terhadap karakteristik mortar geopolimer berdasarkan nilai kuat tekan, densitas, dan absorpsi serta membandingkannya dengan mortar. Pengujian dilakukan dengan benda uji yang berumur 28 hari dengan variasi perbandingan campuran 1:3,5 dan 1:4,25. Parameter yang diuji meliputi kuat tekan, durabilitas, densitas, dan absorpsi sebagai indikator kualitas mortar.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa mortar memiliki karakteristik yang lebih baik dibandingkan mortar geopolimer. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada mortar perbandingan 1:3,5 sebesar 2,78 MPa, sedangkan mortar geopolimer pada perbandingan yang sama sebesar 2,70 MPa. Nilai densitas tertinggi diperoleh pada mortar 1:3,5 sebesar 2,78 dan terendah pada mortar geopolimer 1:4,25 sebesar 1,65. Pengujian absorpsi menunjukkan bahwa mortar geopolimer memiliki nilai absorpsi lebih tinggi, yaitu sebesar 8,18% pada campuran 1:3,5 dan 5,48% pada campuran 1:4,25, sedangkan mortar masing-masing sebesar 4,84% dan 3,55%. Secara keseluruhan, mortar menunjukkan densitas yang lebih tinggi, absorpsi yang lebih rendah, dan kuat tekan yang lebih baik dibandingkan mortar geopolimer.

Kata Kunci: Variasi Agregat Halus, Abu Terbang Mortar, Mortar Geopolimer, Kuat Tekan, Densitas, Absorpsi.

Abstract

The use of Portland cement as the main binder in mortar contributes significantly to carbon dioxide (CO_2) emissions, thus requiring a more environmentally friendly alternative material. One such alternative is geopolymer mortar, which utilizes fly ash as a binder with alkali activators in the form of Sodium Hydroxide (NaOH) and Sodium Silicate (Na_2SiO_3). The characteristics of geopolymer mortar are influenced by its mix composition, therefore, mechanical and physical property testing is necessary to determine its performance as a replacement for conventional mortar.

This research aims to analyze the effect of varying fly ash usage on the characteristics of geopolymer mortar based on compressive strength, density, and absorption values, as well as to compare it with conventional mortar. Testing was conducted on 28-day-

old specimens with mix ratio variations of 1:3.5 and 1:4.25. The tested parameters include compressive strength, durability, density, and absorption as indicators of mortar quality.

The results showed that conventional mortar has better characteristics compared to geopolymer mortar. The highest compressive strength value was obtained in conventional mortar with a 1:3.5 ratio at 2.78 MPa, whereas the geopolymer mortar at the same ratio reached 2.70 MPa. The highest density value was obtained in conventional mortar at the 1:3.5 ratio, measuring 2.78, and the lowest was in geopolymer mortar at the 1:4.25 ratio, measuring 1.65. Absorption testing indicated that geopolymer mortar had higher absorption values, specifically 8.18% for the 1:3.5 mix and 5.48% for the 1:4.25 mix, while conventional mortar measured 4.84% and 3.55%, respectively. Overall, conventional mortar exhibited higher density, lower absorption, and better compressive strength compared to geopolymer mortar.

Keywords: Fine Aggregate Variation, Fly Ash Mortar, Geopolymer Mortar, Compressive Strength, Density, Absorption.

1. PENDAHULUAN

Mortar merupakan material komposit yang tersusun atas campuran semen, agregat halus, dan air. Material ini banyak digunakan dalam pekerjaan konstruksi sebagai bahan pengikat berbagai elemen bangunan. Pada mortar, semen berperan sebagai bahan pengikat utama yang sangat menentukan kekuatan serta kualitas ikatan antar material.

Di sisi lain, penggunaan semen dalam jumlah besar memberikan dampak negatif terhadap lingkungan karena menghasilkan emisi karbon dioksida (CO_2) yang tinggi selama proses produksinya. Berdasarkan data Sistem Informasi Material dan Peralatan Konstruksi (SIMP) Kementerian Pekerjaan Umum, volume produksi semen nasional pada tahun 2023 mencapai 119.906.609 ton. Sementara itu, setiap satu ton semen yang diproduksi menghasilkan emisi karbon dioksida sebesar 546 kg (PT Indocement Tunggul Prakarsa Tbk., 2024). Kondisi tersebut mendorong pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan sebagai alternatif pengganti semen portland.

Salah satu alternatif yang banyak dikembangkan adalah mortar geopolimer, yaitu mortar yang memanfaatkan *fly ash* sebagai bahan pengikat utama tanpa menggunakan semen portland. *Fly ash* merupakan limbah hasil pembakaran batu bara yang kaya akan silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3), sehingga berpotensi membentuk ikatan geopolimer melalui proses aktivasi alkali (Salain et al., 2021). Pemanfaatan *fly ash* tidak hanya mengurangi limbah industri, tetapi juga berpotensi menekan emisi karbon pada sektor konstruksi.

Berdasarkan SNI 03-6864-2002, *fly ash* merupakan material pozzolan halus hasil pembakaran batu bara pada pembangkit listrik tenaga uap yang mengandung silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), dan besi oksida (Fe_2O_3). Ketersediaan *fly ash* di Indonesia diperkirakan meningkat dari sekitar 12 juta ton pada tahun 2021 menjadi 16,2 juta ton pada tahun 2027 (Abinawa & Gobel, 2024). Besarnya potensi tersebut menjadikan *fly ash* sebagai material yang layak dimanfaatkan sebagai bahan pengikat alternatif. Selain

itu, penggunaan mortar geopolimer mampu menurunkan emisi karbon hingga lima kali lebih rendah dibandingkan mortar berbasis semen portland (Alim, 2020).

Agar senyawa silika dan alumina pada *fly ash* dapat bereaksi membentuk ikatan geopolimer, diperlukan larutan aktivator alkali. Aktivator yang paling umum digunakan adalah Natrium Hidroksida (NaOH) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3) (Salain et al., 2021). NaOH berfungsi melarutkan senyawa silikat dan aluminat sehingga mempercepat proses polimerisasi, sedangkan Na_2SiO_3 berperan meningkatkan pembentukan jaringan geopolimer yang menghasilkan struktur mortar lebih padat dan kuat (Budiningrum et al., 2021).

Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa komposisi material penyusun mortar geopolimer berpengaruh terhadap sifat mekaniknya. Ujianto dkk. (2020) melaporkan bahwa peningkatan molaritas NaOH dari 8 M menjadi 12 M pada rasio *solid* 0,4 mampu meningkatkan kuat tekan mortar umur 7 hari dari 2,02 MPa menjadi 5,18 MPa, sedangkan pada umur 28 hari meningkat dari 3,11 MPa menjadi 7,97 MPa. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa peningkatan kadar *solid* menghasilkan porositas yang lebih rendah sehingga struktur mortar menjadi lebih rapat, meskipun waktu pengerasannya cenderung lebih lama.

Meskipun demikian, penelitian mengenai mortar geopolimer masih didominasi oleh pembahasan kuat tekan, sedangkan kajian yang menghubungkan variasi penggunaan *fly ash* terhadap karakteristik fisik, seperti porositas dan densitas, masih relatif terbatas. Padahal, densitas dan porositas merupakan parameter penting yang memengaruhi kualitas, kepadatan, dan durabilitas mortar. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui hubungan antara variasi penggunaan *fly ash* dengan sifat mekanik maupun sifat fisik mortar geopolimer.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis karakteristik mortar geopolimer dengan variasi penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengikat yang diaktivasi menggunakan kombinasi larutan NaOH dan Na_2SiO_3 . Parameter yang dikaji meliputi kuat tekan, porositas, dan densitas pada umur perawatan 28 hari. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pengaruh variasi penggunaan *fly ash* terhadap karakteristik mortar geopolimer serta menjadi salah satu referensi dalam pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan.

2. METODE

penelitian ini mencakup studi literatur serta persiapan alat dan bahan. Kebutuhan material yang meliputi pasir, semen, dan abu terbang (*fly ash*) diperoleh dari PT Solusi Bangun Beton Yogyakarta. Guna menjaga kualitasnya, material tersebut disimpan di tempat yang aman dan terlindung dari paparan cuaca secara langsung (hujan dan panas). Selain itu, pemeriksaan kelayakan peralatan laboratorium juga dilakukan untuk memastikan seluruh instrumen dalam kondisi baik dan siap

digunakan.

Setelah tahapan persiapan selesai, proses dilanjutkan dengan pengujian karakteristik material. Pengujian khusus untuk agregat halus (pasir) mencakup beberapa parameter, antara lain: uji berat jenis dan penyerapan air (berdasarkan SNI 1970:2008 dan SNI 2816:2014), kandungan bahan organik (SNI 2816:2014), gradasi agregat (SNI ASTM C136:2012), kadar lumpur (SNI ASTM C117:2012), serta pengujian keausan (SNI 2417:2008).

Tahap perencanaan campuran (*mix design*) perlu dilakukan sebelum proses pencampuran material guna memastikan karakteristik mortar yang dihasilkan sesuai dengan spesifikasi yang ditargetkan. Desain campuran yang digunakan pada penelitian ini menggunakan variasi proporsi antara abu terbang (*fly ash*) dan pasir sebesar 1 : 3,5 dan 1 : 4,25. Proporsi campuran tersebut direncanakan untuk mencapai target kuat tekan sebesar 25 MPa. Berikut tabel perencanaan proporsi campuran mortar geopolimer.

Tabel 2. Proporsi Campuran Mortar Geopolimer /m³

Benda Uji	Semen (Kg)	Fly Ash (Kg)	Air (liter)	Aquades (Liter)	Pasir (Kg)	NaOH (liter)	Na ₂ SiO ₃ (liter)
MG 1 : 3,5	-	425,79	-	205,00	1492,18	65,60	32,80
MP 1 : 3,5	425,79	-	303,40	-	1492,18	-	-
MG 1 : 4,25	-	365,37	-	205,00	1552,60	65,60	32,80
MP 1 : 4,25	365,37	-	303,40	-	1552,60	-	-

Pada penelitian ini, dipersiapkan sebanyak 80 sampel benda uji untuk pengujian kuat tekan, durabilitas, densitas, dan absorpsi. Benda uji dicetak menggunakan cetakan kubus berukuran 5 cm x 5 cm x 5 cm. Tabel jumlah benda uji seperti berikut :

Tabel 3. Jumlah Benda Uji Penelitian

Jenis Benda Uji	Umur Pengujian	Pengujian Kuat Tekan	Pengujian Absorpsi	Pengujian Densitas	Pengujian Durabilitas
		Jumlah Benda Uji			
MG 1 : 3,5	28	5	5	5	5
MP 1 : 3,5	28	5	5	5	5
MG 1 : 4,25	28	5	5	5	5
MP 1 : 4,25	28	5	5	5	5
Σ		80			

Proses pencampuran material mortar geopolimer dilakukan menggunakan bor tangan pengaduk (*hand mixer*) agar seluruh bahan tercampur secara merata dan homogen sesuai dengan proporsi yang telah direncanakan. campuran dimasukkan ke dalam cetakan. Proses pelepasan benda uji dari cetakan (*demolding*) dilakukan setelah 24 jam lalu dimasukan ke oven selama 24 jam dengan suhu 100 °C.

Pada saat umur benda uji mencapai 28 hari , dilakukan pengujian densitas, Absorpsi dan kuat tekan dilaksanakan di Laboratorium Universitas Muhammadiyah Surakarta. Analisis dilakukan terhadap keseluruhan data pengujian yang terkumpul, lalu dijabarkan dalam wujud grafik. Tujuan dari analisis

ini adalah untuk mengevaluasi apakah inovasi yang diaplikasikan mampu meningkatkan sifat mekanik dari mortar geopolimer yang diteliti.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengujian Kuat Tekan

Pengujian kuat Tekan dilakukan ketika mortar geopolimer berumur 28 hari dengan menggunakan mesin UTM (*Universal testing Machine*), Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa kuat mortar menerima tekanan. Pengujian Kuat Tekan menggunakan rumus dibawah ini :

$$f'c = \frac{P}{A}$$

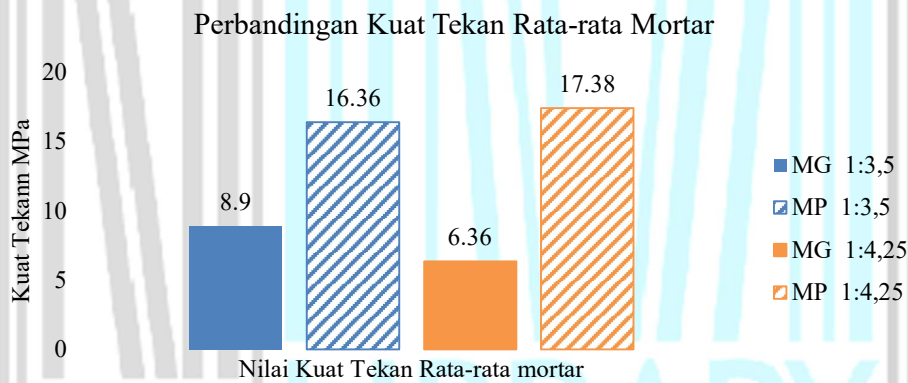
Keterangan :

$f'c$ = Kuat Tekan dalam satuan Mega Pascal (Mpa)

P = Gaya Tekan Maksimum yang diberikan

A = Luas Penampang Benda Uji

Hasil pengujian kuat tekan mortar dapat dilihat pada gambar 1 dibawah :



Gambar 1 Hasil Pengujian Kuat tekan Mortar

Berdasarkan Gambar 3. mortar PCC (MP) menunjukkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan mortar geopolimer (MG) pada seluruh variasi campuran. Pada variasi campuran 1:3,5, kuat tekan MP 1:3,5 mencapai 16,36 MPa, lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tekan MG 1:3,5 yang sebesar 8,90 MPa. Kondisi serupa juga terjadi pada variasi 1:4,25, di mana kuat tekan MP 1:4,25 tercatat sebesar 17,38 MPa, sedangkan MG 1:4,25 hanya mencapai 6,36 MPa. Pada mortar PCC (MP) , perubahan rasio campuran dari 1:3,5 menjadi 1:4,25 memberikan peningkatan nilai kuat tekan dari 16,36 MPa menjadi 17,38 MPa. Sebaliknya, pada MG, perubahan rasio dari 1:3,5 menjadi 1:4,25 yang menandakan adanya penambahan persentase agregat halus, justru mengakibatkan penurunan kuat tekan yang cukup signifikan dari 8,90 MPa menjadi 6,36 MPa.

Penurunan kuat tekan pada mortar geopolimer ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pramadani, dkk. (2024), yang menyimpulkan bahwa penambahan kadar agregat halus dapat melemahkan kekuatan ikat antar material penyusun mortar, sehingga berdampak langsung pada menurunnya kapasitas kuat tekan secara keseluruhan.

3.2. Pengujian Durabilitas

Pengujian durabilitas mortar dilakukan dengan cara yang sama dengan pengujian kuat tekan mortar, yaitu ketika mortar geopolimer berumur 28 hari dengan menggunakan mesin UTM (*Universal testing Machine*), Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa kuat mortar menerima tekanan. Pengujian Kuat Tekan menggunakan rumus dibawah ini :

$$f'c = \frac{P}{A}$$

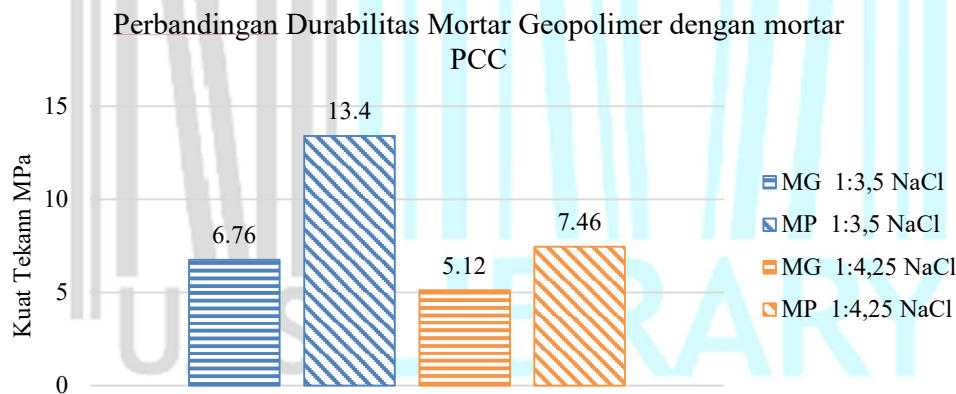
Keterangan :

$f'c$ = Kuat Tekan dalam satuan Mega Pascal (Mpa)

P = Gaya Tekan Maksimum yang diberikan

A = Luas Penampang Benda Uji

Berikut merupakan hasil pengujian durabilitas mortar yang direndam pada cairan NaCl, dapat dilihat pada gambar 2 dibawah:



Gambar 2 Hasil Pengujian Durabilitas Mortar

Berdasarkan Gambar 2. Mortar PCC (MP) menunjukkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan mortar geopolimer (MG) pada seluruh variasi campuran. Pada variasi campuran 1:3,5, kuat tekan MP 1:3,5 mencapai 16,36 MPa, lebih tinggi dibandingkan dengan kuat tekan MG 1:3,5 yang sebesar 8,90 MPa. Kondisi serupa juga terjadi pada variasi 1:4,25, di mana kuat tekan MP 1:4,25 tercatat sebesar 17,38 MPa, sedangkan MG 1:4,25 hanya mencapai 6,36 MPa. Pada mortar PCC (MP) , perubahan rasio campuran dari 1:3,5 menjadi 1:4,25 memberikan peningkatan nilai kuat tekan dari 16,36 MPa menjadi 17,38 MPa. Sebaliknya, pada MG, perubahan rasio dari 1:3,5 menjadi 1:4,25 yang menandakan adanya penambahan persentase

agregat halus, justru mengakibatkan penurunan kuat tekan yang cukup signifikan dari 8,90 MPa menjadi 6,36 MPa.

Penurunan kuat tekan pada mortar geopolimer ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Pramadani, dkk. (2024), yang menyimpulkan bahwa penambahan kadar agregat halus dapat melemahkan kekuatan ikat antar material penyusun mortar, sehingga berdampak langsung pada menurunnya kapasitas kuat tekan secara keseluruhan.

3.3. Pengujian Densitas

Pengujian ini dilakukan dengan melepas bekisting setelah 28 hari dan diamkan selama 24 jam. Pengujian tersebut dilaksanakan untuk mengetahui densitas atau bobot isi pada sampel variasi campuran mortar geopolimer, Rumus yang dipakai pada pengujian Densitas sebagai berikut :

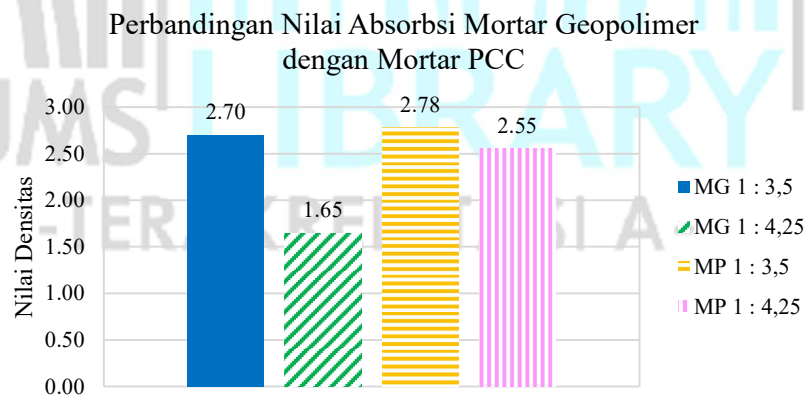
$$\rho = \frac{m}{V}$$

Keterangan :

ρ = Densitas atau Massa Jenis

m = Massa Benda Uji

V = Volume Benda Uji



Gambar 3 Hasil Pengujian Densitas

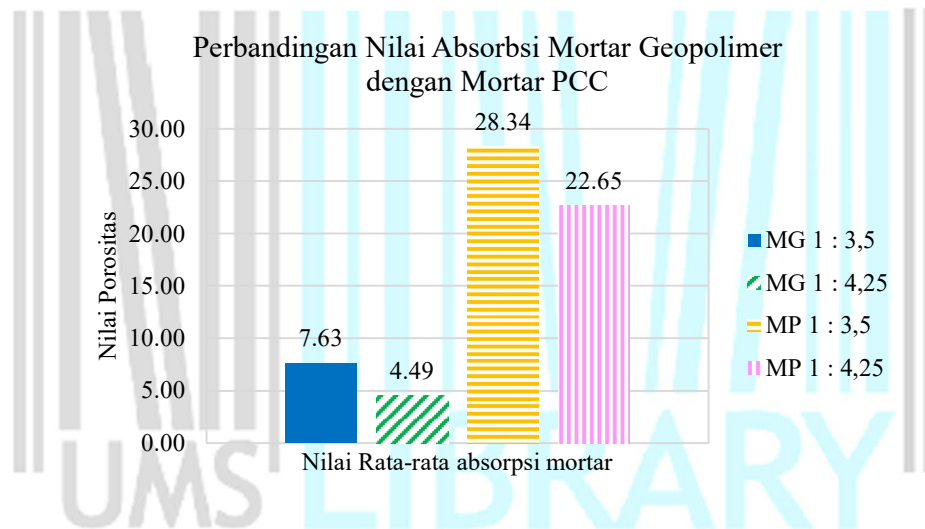
Nilai densitas mortar geopolimer dan mortar menunjukkan perbedaan pada setiap variasi campuran. Campuran dengan perbandingan 1:3 menghasilkan densitas yang lebih tinggi dibandingkan campuran 1:4,25 pada kedua jenis mortar. Nilai densitas tertinggi diperoleh pada MP 1:3,5 sebesar 2,78, diikuti MG 1:3 sebesar 2,70, MP 1:4,25 sebesar 2,55, dan nilai terendah pada MG 1:4,25 sebesar 1,65. Dibandingkan dengan mortar geopolimer pada komposisi yang sama, densitas mortar lebih tinggi sebesar 2,96% pada campuran 1:3,5 dan 54,55% pada campuran 1:4,25. Selain itu, perubahan komposisi campuran dari 1:3,5 menjadi 1:4,25 menyebabkan penurunan densitas sebesar 38,89% pada mortar geopolimer dan 8,27% pada mortar

. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan proporsi agregat halus cenderung menurunkan nilai densitas mortar, terutama pada mortar geopolimer.

Pada jurnal yang diteliti oleh (Priastiwi dkk, 2023) menyatakan bahwa Mortar Geopolimer (MGP) memiliki penurunan dibandingkan dengan mortar (MPPC) sebesar 2,11 %. Hal tersebut sejalan dengan hasil penelitian yang kami lakukan.

3.4. Pengujian Absorpsi

Absorpsi diuji dengan mengukur jumlah air yang dapat diserap ke dalam mortar, atau kemampuan air untuk memasuki mortar melalui rongga-rongga pada mortar, hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4 dibawah :



Gambar 4 Hasil Pengujian Absorpsi

Berdasarkan hasil pengujian porositas dan tingkat absorpsi, terlihat pola penurunan nilai seiring dengan peningkatan rasio campuran mortar. Perbandingan antara MG 1:3,5 dan MG 1:4,25, mengalami penurunan yang mencapai 41,15% . Pada MP 1:3,5 dan MP 1:4,25 juga mengalami penurunan, yakni sebesar 20,08%. Penurunan absorpsi pada rasio yang lebih tinggi ini menunjukkan bahwa penambahan proporsi tertentu mampu mengisi rongga antar-partikel dengan lebih baik.

Pada penelitian yang dilakukan oleh (wenda dkk, 2018) menyatakan bahwa peningkatan proporsi agregat halus pada variasi campuran mortar berbanding lurus dengan kenaikan nilai absorpsi juga semakin besar

4. PENUTUP

4.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, densitas, dan absorpsi terhadap mortar geopolimer dan mortar pada umur 28 hari, dapat disimpulkan bahwa:

- Variasi perbandingan campuran berpengaruh terhadap karakteristik mortar. Campuran

- 1:3,5 menghasilkan sifat mekanik dan fisik yang lebih baik dibandingkan campuran 1:4,25, baik pada mortar geopolimer maupun mortar .
- b. Mortar menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan mortar geopolimer. Hal ini ditunjukkan oleh nilai kuat tekan dan densitas yang lebih tinggi serta nilai absorpsi yang lebih rendah pada kedua variasi campuran.
 - c. Nilai densitas tertinggi diperoleh pada mortar dengan perbandingan MG 1:3,5 sebesar 2,78, sedangkan densitas terendah diperoleh pada mortar geopolimer dengan perbandingan MG 1:4,25 sebesar 1,65. Hal ini menunjukkan bahwa mortar memiliki struktur yang lebih padat dibandingkan mortar geopolimer.
 - d. Hasil pengujian absorpsi menunjukkan bahwa mortar geopolimer memiliki daya serap air yang lebih tinggi dibandingkan mortar . Nilai absorpsi mortar geopolimer sebesar 8,18% (MG 1:3,5) dan 5,48% (MG 1:4,25), sedangkan mortar sebesar 4,84% (MP 1:3,5) dan 3,55% (MP 1:4,25). Semakin rendah nilai absorpsi, semakin rapat struktur pori mortar.
 - e. Secara keseluruhan, mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* memiliki potensi sebagai material konstruksi yang lebih ramah lingkungan karena dapat mengurangi penggunaan semen Portland. Namun, pada kondisi penelitian ini, karakteristik kuat tekan, densitas, dan absorpsi mortar geopolimer masih berada di bawah mortar , sehingga diperlukan optimasi komposisi campuran dan aktivator alkali agar diperoleh performa yang lebih baik.

4.2 Saran

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan, densitas, dan absorpsi terhadap mortar geopolimer dan mortar pada umur 28 hari, terdapat beberapa saran sebagai berikut :

- a. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi molaritas larutan NaOH dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ yang berbeda untuk memperoleh komposisi aktivator yang optimum sehingga dapat meningkatkan kuat tekan serta menurunkan nilai absorpsi mortar geopolimer.
- b. Pengujian sebaiknya dilakukan pada umur yang lebih bervariasi, seperti 7, 14, 28, dan 56 hari, untuk mengetahui perkembangan karakteristik mortar geopolimer seiring bertambahnya umur perawatan.
- c. Penelitian selanjutnya disarankan menambahkan pengujian sifat fisik dan mekanik lainnya, seperti porositas, kuat lentur, kuat tarik belah, serta uji durabilitas terhadap lingkungan agresif agar karakteristik mortar geopolimer dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.
- d. Perlu dilakukan optimasi komposisi campuran, termasuk penggunaan bahan tambah (*admixture*) atau material pozzolan lain, sehingga mortar geopolimer dapat menghasilkan densitas yang lebih tinggi, absorpsi yang lebih rendah, dan kuat tekan yang mendekati atau

melampaui mortar .

- e. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan analisis ekonomi dan analisis dampak lingkungan (*life cycle assessment*) untuk menilai kelayakan penggunaan mortar geopolimer sebagai alternatif pengganti mortar pada skala konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abinawa, A., & Gobel, A. (2024). *Potensi pemanfaatan fly ash sebagai material konstruksi ramah lingkungan di Indonesia*. Jurnal Teknik Sipil, 31(1), 45–54.
- Alim, M. A. (2020). *Pemanfaatan fly ash sebagai bahan dasar mortar geopolimer untuk mengurangi emisi karbon*. Jurnal Rekayasa Sipil, 16(2), 87–95.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-6864-2002: Spesifikasi abu terbang dan pozzolan alam mentah atau yang telah dikalsinasi untuk digunakan dalam beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 1970:2008. Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 2417:2008. Cara uji keausan agregat dengan mesin Los Angeles*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI ASTM C117:2012. Metode uji bahan yang lebih halus dari saringan No. 200 (75 μ m) pada agregat mineral dengan pencucian*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *SNI ASTM C136:2012. Metode uji untuk analisis saringan agregat halus dan agregat kasar*. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2014). *SNI 2816:2014. Metode pengujian kotoran organik dalam pasir untuk beton*. Badan Standardisasi Nasional.
- Budiningrum, D., Suprpto, S., & Nugroho, A. (2021). *Pengaruh penggunaan natrium hidroksida dan natrium silikat terhadap karakteristik mortar geopolimer berbasis fly ash*. Jurnal Teknik Sipil, 28(2), 101–109.
- Mubarak, F., Solikin, M., & Sunarjono, S. (2023). *Perbandingan tingkat kehalusan fly ash terhadap durabilitas dan sifat mekanis high volume fine fly ash-self compacting concrete*. Wahana Teknik Sipil, 28(2), 277–289.
- Pramadani, A., dkk. (2024). *Pengaruh variasi proporsi agregat halus terhadap kuat tekan mortar*. Jurnal Rekayasa Sipil.
- Pramadani, M., Irwansyah, A., Hanif, H., Sulaiman, S., & Bahri, S. (2024). *Pengaruh penggunaan variasi agregat halus terhadap kuat tekan mortar*. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri*

Lhokseumawe, 7(1), A-141–A-144.

- Priastiwi, N., dkk. (2023). *Karakteristik mortar geopolimer berbahan dasar fly ash dibandingkan mortar*. Jurnal Teknik Sipil.
- Priastiwi, Y. A., Adi, R. Y., Hidayat, A., Hanif, A. N., & Bima. (2023). *Comparison of physical properties and strength of geopolimer mortar with white soil substitution and mortar with Portland pozzolan cement under corrosive seawater conditions*. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 20(3), 534–544.
- PT Indocement Tunggul Prakarsa Tbk. (2024). *Laporan keberlanjutan (Sustainability Report) 2024*. PT Indocement Tunggul Prakarsa Tbk.
- Salain, I. M. A. K., Putra, I. G. A. , & Sutapa, I. K. (2021). *Karakteristik mortar geopolimer berbahan dasar fly ash dengan aktivator natrium hidroksida dan natrium silikat*. Jurnal Ilmiah Teknik Sipil, 25(1), 45–54.
- Sistem Informasi Material dan Peralatan Konstruksi (SIMPK). (2023). *Data produksi semen nasional tahun 2023*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Ujiyanto, M., Hidayat, T., & Nugraha, A. (2020). *Pengaruh perbandingan kadar solid larutan abu terbang (fly ash) terhadap kuat tekan mortar geopolimer dengan aktivator NaOH dan Na₂SiO₃*. Jurnal Rekayasa Sipil, 14(3), 145–153.
- Wenda, Kantius, Safrin Zuridah, and Budi Hastono. (2018). “Pengaruh Variasi Komposisi Campuran Mortar Terhadap Kuat Tekan.” *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan dan Rekayasa Sipil* 1(1): 8–13.