



Pengaruh Ukuran Butir Maksimum Agregat Halus terhadap Sifat Fisik dan Kekuatan Mortar Geopolimer

Yulita Arni Priastiwi*, Bobby Rio Indriyantho, Nadhifa Thufailah, Oryza Kartika Putri

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

*)Email correspodng author: yulitaarnipriastiwi@gmail.com

Received: 14 Oktober 2025 Revised: 23 Juli 2026 Accepted: 23 Agustus 2026

Abstract

Good gradation of fine aggregates in mortar serves to maximize density, strength and durability by filling cavities efficiently. This study aims to compare the physical properties and strength of geopolymer mortar with maximum grain size variations. Experimental research by making a 50×50×50 mm mortar cube with four variations of the maximum grain size of fine aggregate has been conducted. The constituent of geopolymer mortar consists of fine aggregates in the form of rock ash with different maximum grain sizes of 4.75 mm, 2.36mm, 1.18mm, and 0.075mm, fly ash, white soil, and mixed activators of NaOH 8M and Na₂SiO₃. The test parameters include porosity, density, absorption and compressive strength coupled with fly ash microstructure, white soil, and geopolymer mortar. The test results showed that geopolymer mortars with larger maximum grains (GT 4.75 and GT 2.36) had a more stable strength rate, although the maximum grain of a 1.18 filter (GT 1.18) produced the highest compressive strength of all variations at any age. GT 4.75 mortar has the best porosity value, but the best density and absorption are found in GT 2.36 mortar and the best compressive strength in GT 1.18 mortar. Uneven mixing of chemical compositions in geopolymer mortar allows the appearance of efflorescence which will lead to a decrease in the quality of the mortar.

Keywords : Geopolymer mortar, rock ash, fly ash, white soil, efflorescence

Abstrak

Gradasi agregat halus yang baik dalam mortar berfungsi memaksimalkan kepadatan, kekuatan serta keawetan dengan mengisi rongga secara efisien. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan sifat fisik dan kekuatan mortar geopolimer dengan variasi ukuran butir maksimum. Penelitian eksperimental dengan membuat kubus mortar 50×50×50 mm dengan empat variasi ukuran butir maksimum agregat halus telah dilakukan. Penyusun mortar geopolimer terdiri dari agregat halus berupa abu batu dengan ukuran butir maksimum berbeda yaitu 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, dan 0,075mm, fly ash, tanah putih, dan aktivator campuran NaOH 8M dan Na₂SiO₃. Parameter pengujian meliputi porositas, densitas, absorpsi dan kuat tekan ditambah dengan mikrostruktur fly ash, tanah putih, dan mortar geopolimer. Hasil pengujian menunjukkan mortar geopolimer dengan butir maksimum lebih besar (GT 4,75 dan GT 2,36) memiliki laju kekuatan lebih stabil, meskipun butir maksimum saringan 1,18 (GT 1,18) menghasilkan kuat tekan tertinggi dari seluruh variasi pada setiap umurnya. Mortar GT 4,75 memiliki nilai porositas terbaik, tetapi densitas dan absorpsi terbaik terdapat pada mortar GT 2,36 dan kuat tekan terbaik pada mortar GT 1,18. Pencampuran komposisi kimia yang kurang merata pada mortar geopolimer memungkinkan munculnya efflorescence yang akan menyebabkan penurunan mutu mortar.

Kata Kunci : Mortar geopolimer, Abu batu, Fly ash, Tanah putih, efflorescence

Pendahuluan

Mortar merupakan campuran material yang terdiri dari agregat halus (pasir), bahan perekat (semen portland) dan air dengan komposisi tertentu (Badan Standardisasi Nasional, 2002). Selain menggunakan semen portland sebagai bahan pengikat juga dapat digunakan *fly ash* yang diaktivasi sebagai bahan pengikat. Mortar tanpa semen ini sering disebut juga mortar geopolimer. Penggunaan *fly ash* sebagai pengganti semen Portland terbukti dapat mengurangi limbah dan dampak lingkungan dari industri konstruksi.

Substitusi *fly ash* dalam campuran beton tidak hanya mengurangi volume limbah yang dibuang ke tempat pembuangan akhir, tetapi juga menurunkan jejak karbon dari beton yang dihasilkan (Orozco *et al.*, 2023; Maroszek *et al.*, 2025). Penggantian semen dengan *fly ash* menunjukkan bahwa beton yang dihasilkan memiliki kekuatan tekan yang baik, bahkan setelah terendam 365 hari (Rutkowska *et al.*, 2021). Selain itu, penggunaan *fly ash* dari pembangkit listrik tenaga uap sebagai pengganti semen atau agregat juga menunjukkan potensi untuk meningkatkan sifat mekanik dan stabilitas material (Tian *et al.*, 2023). Dengan demikian, penerapan *fly ash* dalam konstruksi tidak hanya mendukung keberlanjutan tetapi juga mengoptimalkan penggunaan sumber daya (Xie *et al.*, 2015).

Beberapa penelitian mengenai beton maupun mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* yang disubstitusi dengan material lainnya seperti tanah putih, abu sekam padi, *copper slag* dan lain-lain juga telah dilakukan. Penelitian Priastiwi *et al.* (2020), substitusi tanah putih 15% terhadap *fly ash* pada mortar geopolimer meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer dengan kuat tekan optimum mencapai 22,53 MPa saat umur 28 hari dibanding variasi lainnya. Dalam Afif dan Akbar Bale, (2019), penggunaan abu batu dengan kadar 20% terhadap agregat halus dan penambahan *superplasticizer* berjenis *sika viscocrete* 3115N sebesar 0,6% dari berat semen menghasilkan kuat tekan optimum sebesar 45,44 MPa pada umur 28 hari.

Bahan mortar terdiri dari campuran agregat, semen atau bahan pengikat dan airnya (ASTM C270, 2024). Agregat menempati 70-90% dari volume mortar. Maka, agregat yang digunakan haruslah dengan mutu yang baik agar mendapatkan mutu mortar yang tinggi. Gradasi agregat mempengaruhi sifat mortar yang dihasilkan oleh pencampuran agregat halus dengan

memperhitungkan gradasinya. Dari penelitian Kushartomo *et al.*, (2020), didapati bahwa besar butiran maksimum agregat halus, dan perbandingan faktor air semen pada perencanaan campuran beton mempengaruhi nilai kuat lentur dari volume pori-pori yang terbentuk.

Semakin besar ukuran butiran agregat halus maka jumlah volume pori-pori yang terbentuk juga semakin besar. Volume pori-pori yang terbentuk semakin besar maka nilai *modulus of rupture* (R) menjadi semakin kecil dan sebaliknya sedangkan Karadumpa dan Pancharathi (2022) menyatakan gradasi agregat yang berbeda menghasilkan kerapatan yang baik sebesar 10,37%, maka dari itu pada penelitiannya menggunakan ukuran agregat berkisar 4,75 mm dan 0,15 mm. Menurut penelitian Jiang *et al.* (2022) ukuran partikel agregat berpengaruh terhadap struktur pori mortar, yang menghasilkan pori struktur menjadi tinggi terutama mesopori dan makropori meningkat secara signifikan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh ukuran butiran maksimum agregat halus terhadap kekuatan tekan dan sifat fisik mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih.

Bahan dan Metode

Penelitian dilakukan secara eksperimental di laboratorium dengan membuat benda uji kubus mortar berukuran 50×50×50 mm. Mortar merupakan mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih dengan variasi ukuran butir agregat halus maksimum 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm dan 0,075 mm.

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian meliputi abu batu, tanah putih, *fly ash*, natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃). Deskripsi dan kegunaan masing-masing bahan tersebut adalah sebagai berikut;

Abu batu digunakan sebagai agregat halus pengganti pasir alami. Abu batu merupakan limbah dari proses pemecahan bongkahan batu, yang termasuk dalam agregat halus jika ditinjau dari ukuran butirannya. Abu batu sendiri mempunyai penyerapan air yang lebih tinggi dibandingkan dengan pasir alami (Ozcelik & Ozguven, 2014). Agregat halus yang digunakan harus memenuhi syarat pada (ASTM C 33/M, 2023) yaitu memiliki diameter maksimum 4,75mm. Sebelum pembuatan mortar sesuai dengan variasi yang digunakan, abu batu diayak dan lolos saringan 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm dan 0,075mm. Kemudian agregat halus dicuci untuk mengurangi kadar lumpur

dan zat organik, dan dikeringkan untuk mendapatkan kadar air mendekati 0%.

Tanah putih digunakan sebagai pengikat bersama fly ash dan aktivator dalam mortar geopolimer. Tanah putih sendiri merupakan material alami yang terbentuk melalui proses pelapukan biologi dan kimiawi. Unsur kimia yang terdapat pada tanah putih adalah kalsium, magnesium, silika, alumina dan besi (Hanif & Bima, 2022). Tanah putih yang digunakan berasal dari Kupang, Nusa Tenggara Timur. Agar dapat digunakan sebagai pengikat pada campuran mortar sebelum pembuatan mortar, tanah putih dihaluskan hingga lolos saringan no.200 atau memiliki ukuran lebih kecil dari 0,075 mm, yang bertujuan untuk mengisi rongga pada mortar. Kemudian dilakukan pengovenan agar tanah putih memiliki kadar air 0%.

Fly ash atau abu terbang adalah material dari sisa pembakaran batu bara yang dialirkan dari ruang pembakaran melalui ketel berupa semburan asap (jelaga) yang telah banyak digunakan sebagai bahan campuran pada beton. *fly ash* yang digunakan berasal dari PLTU Tanjung Jati B, Jepara, Jawa Tengah. Sebelum dilakukan pembuatan mortar, *fly ash* harus dihaluskan agar lolos saringan no.200 atau memiliki ukuran lebih kecil dari 0,075mm. Tujuannya adalah agar *fly ash* mudah tercampur merata dan bereaksi dengan bahan lain. Selanjutnya *fly ash* dioven untuk mendapatkan kadar air mendekati 0%. *Fly ash* dicampur dengan tanah putih dan aktivator, yang berfungsi sebagai perekat pengganti semen dalam mortar geopolimer.

Natrium Hidroksida (NaOH) adalah salah satu bahan kimia yang bersifat basa kuat, dan memiliki sifat mudah larut dalam air dan melepaskan panas ketika dilarutkan. NaOH biasa digunakan untuk menghasilkan reaksi polimerisasi. Menurut penelitian Syaputra *et al.*, (2018), NaOH dengan molaritas 8M memiliki kuat tekan terbesar dibandingkan dengan larutan NaOH 6M dan 10M, maka pada penelitian ini NaOH yang digunakan berbentuk kepingan dengan

molaritas 8M. Natrium Silikat (Na_2SiO_3) adalah senyawa yang berfungsi sebagai bahan alkali aktivator. Na_2SiO_3 biasa disebut *waterglass* karena berbentuk larutan bening yang kental. Na_2SiO_3 tipe Be52 mengandung Na_2O -14,55% dan SiO_2 -33,76% di mana proses pembentukan garamnya menggunakan 52°Be .

Komposisi benda uji

Mortar dibuat dengan proporsi campuran 1 Pca: 2,75 abu batu (Ab). Dengan Pca adalah campuran fly ash, tanah putih, alkali aktivator (NaOH 8M dan Na_2SiO_3 tipe Be52) dengan nilai faktor air *binder* (FAB) yaitu 0,5. Substitusi tanah putih yang digunakan adalah 15% (Priastiwi *et al.*, 2020). Benda uji dibuat empat variasi campuran dengan total semua sampel berjumlah 72 buah benda uji kubus $50 \times 50 \times 50$ mm. Komposisi berat masing – masing varian dapat dilihat pada Tabel 1. Perawatan mortar yang dilakukan pada penelitian ini adalah menyimpan pada suhu ruangan sampai hari pengujian yang telah direncanakan.

Metode pengujian

Sebelum dilakukan pengujian parameter fisik dan kekuatan yang meliputi porositas, densitas, absorpsi dan kuat tekan mortar geopolimer, dilakukan pula tinjauan mikrostruktur *fly ash* dan tanah putih, serta mikrostruktur mortar geopolimer untuk mengetahui keterkaitan dengan parameter tinjauan. Metode pengujian parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

Pengujian mikrostruktur

Pengujian mikrostruktur dilakukan pada *bahan fly ash* dan tanah putih yang digunakan sebagai bahan pengikat pengganti semen, meliputi pengujian SEM-EDX (*Scanning Electron Microscopy Energy Dispersive X-Ray*) dan pengujian XRF (*X-Ray Florescence*). Pengujian mikrostruktur pada mortar hanya menggunakan pengujian SEM-EDX.

Tabel 1. Komposisi per benda uji mortar

Variasi campuran	Tanah putih (kg)	Fly ash (kg)	Abu batu (kg)	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)	Air (ml)
GT 4,75 (lolos saringan No.4)	0,020	0,113	0,400	0,021	0,054	67
GT 2,36 (lolos saringan No.8)	0,020	0,113	0,400	0,021	0,054	67
GT 1,18 (lolos saringan no.16)	0,020	0,113	0,400	0,021	0,054	67
GT 0,075 (lolos saringan no.200)	0,020	0,113	0,400	0,021	0,054	67

SEM adalah sebuah alat yang menghasilkan gambar yang diperbesar dengan menggunakan elektron sebagai pengganti cahaya untuk membentuk suatu gambar, sedangkan EDX adalah teknik analisis yang digunakan untuk analisis unsur atau karakteristik kimia dari sampel. XRF adalah teknik analisis non-destruktif yang digunakan untuk menentukan komposisi unsur bahan.

Pengujian porositas.

Porositas adalah besarnya persentase ruang-ruang kosong atau besarnya kadar pori yang terdapat pada benda uji. Porositas merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi kekuatan benda uji. Tujuan dari pengujian porositas yaitu untuk mengetahui besarnya persentase pori pori pada mortar terhadap volume mortar itu sendiri.

Pengujian dilakukan dengan cara menimbang berat mortar yang berumur 28 hari dengan tiga kondisi, yaitu berat kering, berat SSD dan berat dalam air. Berdasarkan (ASTM C642-21, 2021), porositas dihitung dengan Persamaan 1, dimana A adalah berat sampel dalam air; B adalah berat sampel kondisi SSD, dan C adalah berat sampel kering oven.

Pengujian densitas

Densitas adalah perbandingan antara massa suatu zat dengan volume zat tersebut. Pengambilan data massa dari benda uji mortar dengan ukuran $50 \times 50 \times 50$ mm dilakukan setelah masa perawatan (*curing*) dan pada umur mortar 28 hari. Pengujian ini dilakukan mengacu pada SNI 1973-2016. Setelah mendapatkan berat dan volume mortar, densitas dapat dihitung menggunakan Persamaan 2, dimana D adalah densitas mortar (kg/m^3), M_c adalah massa wadah ukur yang diisi beton (kg), M_m adalah massa wadah ukur (kg) dan V_m adalah volume wadah ukur (m^3).

$$\text{Porositas} = \frac{B-C}{B-A} \times 100\% \quad (1)$$

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (2)$$

$$At = (W_r - W_o) \times 10000 / L_1 \times L_2 \quad (3)$$

Pengujian absorpsi

Pengujian absorpsi dilakukan untuk mengetahui besar penyerapan air relatif dari mortar. Prosedur yang dilakukan untuk melakukan uji penyerapan mortar adalah dengan cara mengukur penyerapan yang terjadi pada mortar di periode waktu 15 menit, 1 jam, 4 jam dan 24 jam. Pengujian absorpsi ini dilakukan pada mortar yang berumur 28 hari. Berdasarkan

ASTM C 1403-22, besarnya absorpsi mortar dapat dihitung menggunakan Persamaan 3. dimana A_t adalah nilai absorpsi mortar ($\text{gr}/100 \text{ cm}^2$), W_t adalah berat benda uji pada waktu T (gr), W_o adalah berat tetap awal benda uji (gr) dan $(L_1 \times L_2)$ adalah luas permukaan benda uji (cm^2).

Pengujian kuat tekan

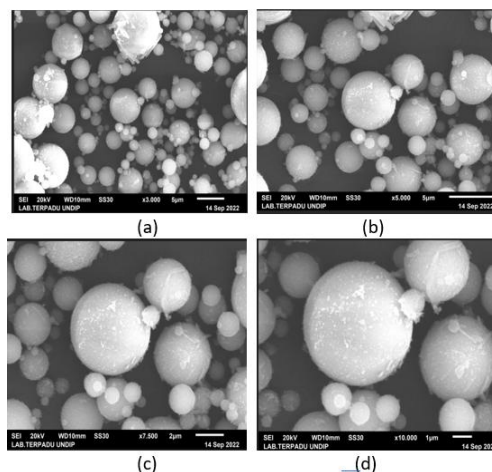
Kuat tekan mortar merupakan gaya maksimum per satuan luas yang bekerja pada benda uji mortar. Pengujian kuat tekan mortar pada penelitian ini dilakukan pada saat umur mortar 7, 14, 28 dan 56 hari. Berdasarkan ASTM C109/C109M-24, nilai kuat tekan dapat dihitung menggunakan rumus $f_c' = P/A$, dimana f_c' adalah kekuatan tekan mortar (MPa atau N/mm^2); P = Gaya tekan maksimum (N); dan A merupakan luas bidang tekan (mm^2).

Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini disajikan hasil pengujian mikrostruktur, densitas, absorpsi, dan kuat tekan, porositas serta pembahasan berdasarkan hasil pengujian tersebut.

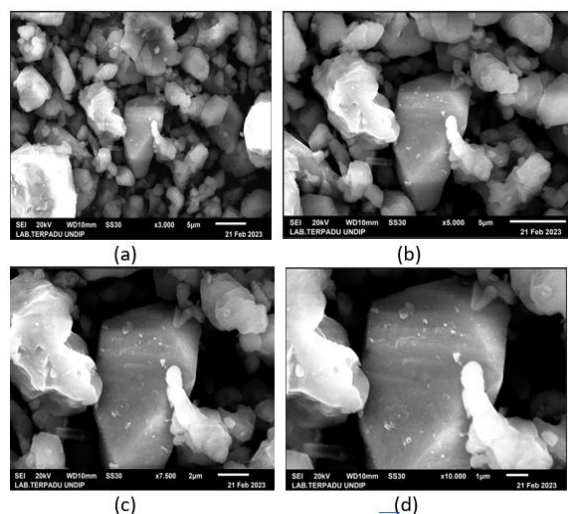
Pengujian mikrostruktur

Pada pengujian mikrostruktur dilakukan tiga macam pengujian yaitu pengujian SEM, EDX, dan XRF. Pengujian SEM dilakukan untuk menganalisa karakteristik fly ash, tanah putih, serta mortar geopolimer. Hasil pengujian SEM untuk *fly ash* dilakukan dengan perbesaran 3000x; 5000x; 7500x; serta 10.000x dan terlihat pada Gambar 1.



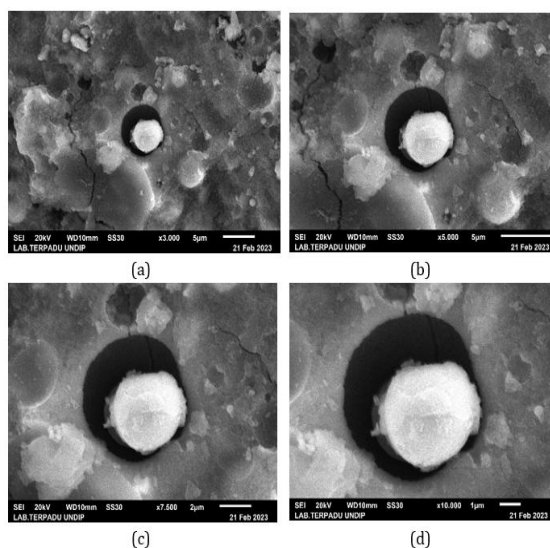
Gambar 1. Hasil SEM pada fly ash
(a) perbesaran 3000x, (b) perbesaran 5000x,
(c) perbesaran 7500x, (d) perbesaran 10.000x

Hasil SEM menunjukkan bahwa mikrostruktur *fly ash* terlihat seperti partikel kaca, berongga, dan bulat yang merupakan *cenospheres* (bola berongga berdinding tipis) dan tekstur permukaan tampak halus dan padat. Tampak warna dan ukuran butir yang berbeda, yang menunjukkan perbedaan komposisi kimia (Ma *et al.*, 2021), kondisi oksidasi serta densitas elemennya (Nurmalita *et al.*, 2023). Hasil SEM tanah putih yang dilakukan dengan perbesaran 3000x, 5000x, 7500x, dan 10.000x disajikan pada Gambar 2, dengan hasil yang menunjukkan bahwa tanah putih memiliki morfologi permukaan dan bentuk butir yang jauh lebih kompleks, berbentuk lonjong segitiga menyerupai bebatuan dengan ukuran bervariasi. Perbedaan warna gelap dan terang dalam pengujian SEM tanah putih dikarenakan variasi pada unsur seperti Ca yang memengaruhi intensitas skala abu-abu pada gambar SEM karena perbedaan hamburan balik elektron atau emisi elektron sekunder (Ma, Wang and Xu, 2021).

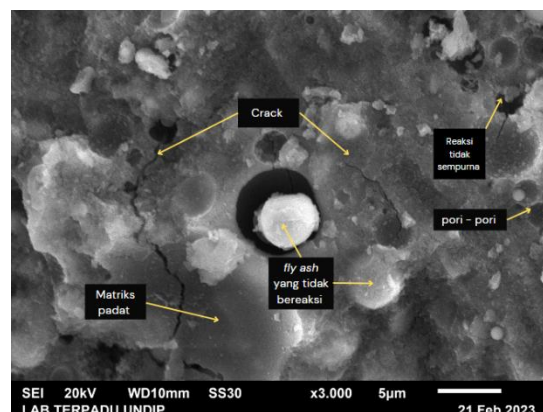


Gambar 2. Hasil SEM pada tanah putih
(a) perbesaran 3000x, (b) perbesaran 5000x,
(c) perbesaran 7500x, (d) perbesaran 10.000x

Dalam Gambar 3 ditunjukkan hasil SEM mortar geopolimer yang menunjukkan morfologi mortar geopolimer dengan *fly ash* dan tanah putih memiliki matriks yang padat namun memiliki *crack* dan juga pori-pori kecil. Terlihat partikel *fly ash* yang masih utuh menandakan tidak bereaksi secara sempurna. Adanya partikel *fly ash* yang tidak bereaksi sempurna dan terdapat pori-pori mortar seperti tampak dalam Gambar 4 walaupun dalam jumlah kecil dapat mempengaruhi densitas serta kuat tekan mortar. Pengujian EDX dilakukan guna membandingkan kandungan senyawa oksida dalam *fly ash*, tanah putih maupun mortar geopolimer.



Gambar 3. Hasil SEM pada Mortar
(a) perbesaran 3000x, (b) perbesaran 5000x,
(c) perbesaran 7500x, (d) perbesaran 10.000x



Gambar 4. Hasil analisis SEM pada mortar

Pada Tabel 2 ditunjukkan hasil senyawa oksida yang terkandung pada *fly ash* terbanyak adalah SiO_2 (23,41%) dan Al_2O_3 (12,85%), sedangkan untuk tanah putih terbesar adalah CaO (66,07%). Setelah kedua material bercampur dengan abu batu menjadi mortar geopolimer kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 meningkat dibanding dua material penyusunnya, sedangkan CaO berkurang sangat signifikan.

Penambahan senyawa SiO_2 dan Al_2O_3 dimungkinkan berasal dari abu batu dan Na_2SiO_3 yang ikut terlibat dalam pencampuran. Kandungan SiO_2 (42,7%) dan Al_2O_3 (15,04%) yang cukup tinggi dalam mortar umumnya menghasilkan peningkatan sifat mekanik dan daya tahan, meskipun dapat berdampak negatif pada kemudahan pengerjaan karena berkurangnya fluiditas (Feng *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2025).

Tabel 2. Hasil EDX

Parameter pengujian	Fly ash (% berat)	Tanah putih (% berat)	Mortar (% berat)
Na ₂ O	2,95	-	8,94
MgO	3,32	-	1,78
Al ₂ O ₃	12,85	0,52	15,04
SiO ₂	23,41	-	42,72
SO ₃	1,61	-	-
K ₂ O	0,67	-	2,51
CaO	7,90	66,07	6,02
TiO ₂	0,54	-	0,60
FeO	5,48	-	5,46
CuO	1,10	1,77	-
ZnO	1,13	-	-

Pada Tabel 3 terlihat hasil XRF yang menunjukkan unsur-unsur terbesar dalam *fly ash* adalah Si (14%), Fe (7,2%), Al (6,9%), dan Ca (6,4%). Keempat unsur ini sama dengan yang ada dalam semen sebagai sumber reaktivitas puzzolanik (Yoon *et al.*, 2022). Dalam hasil uji oxide XRF (Tabel 4), komposisi dominan fly ash diantaranya silika (SiO₂) 29,9%, Alumina (Al₂O₃) 13 % dan besi (Fe₂O₃) 10,5% dan kapur (CaO) 9,04%, sedangkan tanah putih didominasi oleh kandungan CaO sebesar 52,2%, senyawa tersebut memiliki fungsi dalam proses pengikatan dan pengerasan pada campuran mortar. Hasil pengujian diatas mendekati sama dengan pengujian menurut (Hunggurami *et al.*, 2015) yang mana hasil pengujian didominasi oleh kandungan CaO sebesar 56,19%.

Tabel 3 Hasil uji elemen XRF

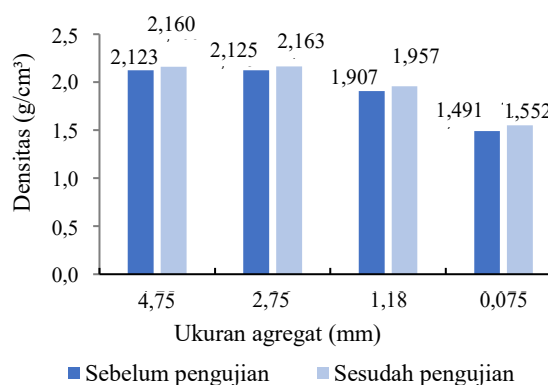
Parameter Pengujian	Fly ash (% berat)	Tanah putih (% berat)
Mg	0,615	-
Al	6,930	0,120
Si	14,00	0,304
P	0,129	0,065
S	0,391	0,007
K	1,430	0,032
Ca	6,400	37,30
Ti	0,652	-
Mn	0,053	-
Fe	7,240	0,127
Cu	0,013	-
Zn	0,019	-
Rb	0,011	-
Sr	0,166	0,066
Ag	0,026	-
Ag	-	0,044
Balance	62,0	62,0

Tabel 4. Hasil uji oxide XRF

Parameter pengujian	Fly ash (% berat)	Tanah putih (% berat)
MgO	0,543	-
Al ₂ O ₃	13,000	0,227
SiO ₂	29,900	0,650
P ₂ O ₃	0,298	0,149
SO ₃	0,984	0,017
K ₂ O	1,730	0,039
CaO	9,040	52,20
TiO ₂	1,100	-
MnO	0,069	-
Fe ₂ O ₃	10,50	0,182
CuO	0,017	-
ZnO	0,024	-
Rb ₂ O	0,012	-
SrO	0,199	0,078
ZrO ₂	0,036	-
Ag ₂ O	-	0,047
Balance	32,5	46,5

Pengujian densitas

Dalam pengujian densitas dilakukan penimbangan pada mortar kubus ukuran 50x50x50 mm sebelum dan sesudah pengujian pada keempat variasi mortar. Dikarenakan benda uji menggunakan *curing* penyimpanan pada suhu ruangan, pengujian dapat langsung dilakukan pada umur 28 hari. Pada grafik di Gambar 5 dapat dilihat bahwa variasi GT 2,36 memiliki nilai densitas atau kerapatan tertinggi yaitu 2,163 gr/cm³ dan GT 0,075 memiliki nilai densitas yang terendah yaitu 1,552 gr/cm³.

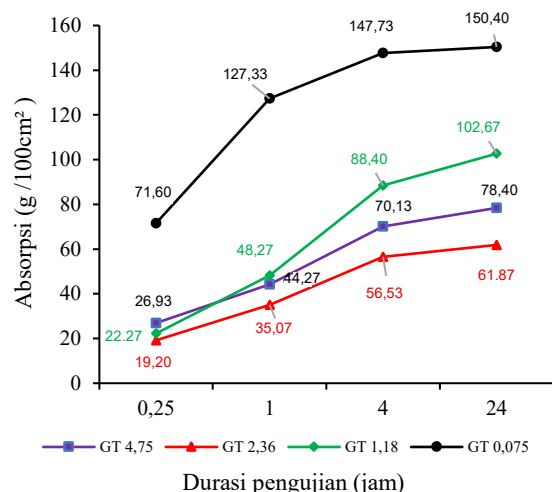


Gambar 5 Perbandingan densitas sebelum dan sesudah pengujian

Pengujian absorpsi

Pengujian absorpsi ini menggunakan benda uji mortar dengan variable waktu penyerapan 0,25 jam, 1 jam, 4

jam dan 24 jam. Pengujian ini dilakukan pada saat umur mortar mencapai 28 hari. Hasil pengujian absorpsi ditunjukkan pada Gambar 6 dan didapatkan bahwa GT 0,075 memiliki nilai absorpsi rata-rata tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Hasil pengujian di atas menunjukkan bahwa GT 0,075 memiliki tingkat penyerapan yang tinggi namun tingkat keawetan yang rendah karena mempunyai absorpsi yang tinggi.



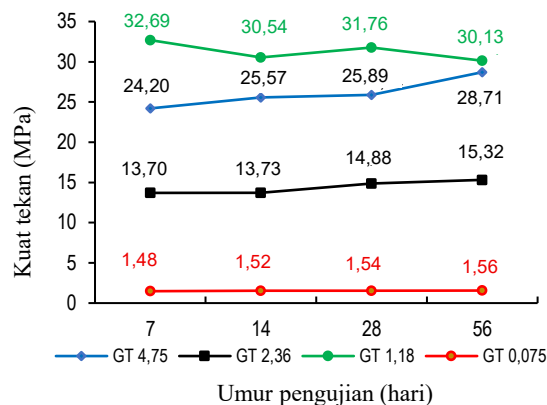
Gambar 6. Absorpsi rata – rata variasi ukuran butir maksimum

Hal ini dapat terjadi dikarenakan absorpsi yang tinggi dapat menyebabkan beton akan rawan terhadap penyerapan air di sekitar beton yang mengandung zat – zat yang dapat merusak beton seperti sulfat, klorida, alkohol dan lain – lain. Penting untuk memperhatikan komposisi dan perlakuan permukaan beton untuk meningkatkan ketahanan terhadap serangan kimia (Song *et al.*, 2008; Zhuang *et al.*, 2024). Beton yang kedap air akan mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton yang tidak kedap air (Li *et al.*, 2013).

Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada keempat variasi mortar pada umur 7, 14, 28 dan 56 hari. Alat yang digunakan untuk pengujian adalah *compression test apparatus*. Hasil pengujian kuat tekan rata-rata mortar dapat dilihat pada Gambar 7. Terlihat posisi kuat tekan variasi ukuran butir maksimum mortar geopolimer dengan urutan tertinggi hingga terendah adalah ukuran butir maksimum agregat 1,18; 4,75; 2,36; dan 0,075. Ukuran GT 1,18 menunjukkan pola yang kurang stabil dibandingkan variasi butir maksimum lainnya meskipun berada pada kuat tekan

yang lebih tinggi. Pada umur pengujian mortar yang sama GT 1,18 memiliki kuat tekan paling tinggi dibandingkan dengan mortar yang lain. GT 1,18 mengalami peningkatan pada umur 28 hari dari 30,54 MPa menjadi 31,76 MPa atau naik sebesar 1%, namun kemudian mengalami penurunan pada hari ke 56 menjadi 30,13 MPa atau turun sebesar 1%.



Gambar 7. Kuat tekan mortar variasi butir maksimum

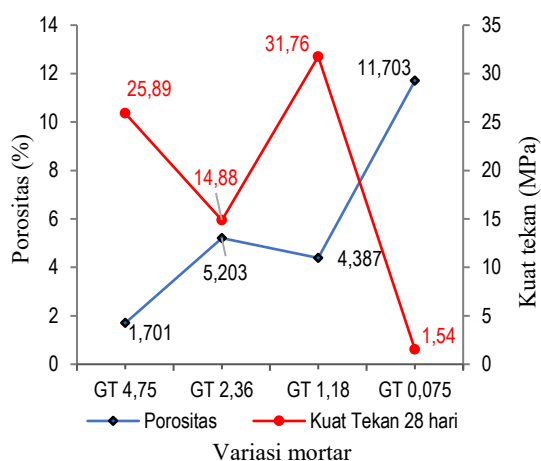
Pada GT 4,75 dan GT 2,36 mengalami kenaikan yang signifikan yaitu pada GT 4,75 dari 24,204 MPa hingga 28,706 MPa atau naik sebesar 5% secara keseluruhan, sedangkan pada GT 2,36 meningkat dari 13,70 MPa hingga 15,32 MPa atau naik sebesar 3% secara keseluruhan. Pada GT 0,075, meskipun menunjukkan kuat tekan terendah dari ukuran butir maksimum lainnya namun kekuatannya stabil yaitu 1,48 MPa – 1,56 MPa atau naik sebesar 2% secara keseluruhan. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa ukuran butir maksimum agregat sangat berpengaruh pada kuat tekan dimana kekuatan tekan umumnya meningkat seiring dengan ukuran agregat maksimum yang lebih besar hingga titik tertentu, tergantung pada desain campuran dan kandungan semennya (Darvishvand *et al.*, 2021). Hal ini juga sejalan dengan penelitian (Mehmetogullari *et al.*, 2020) yang menyatakan bahwa pada mortar, agregat halus dengan gradasi baik dan ukuran butir yang semakin besar cenderung meningkatkan kekuatan tekan, tetapi efek ini berkurang atau berbalik di luar kisaran ukuran tertentu.

Pengujian porositas

Pengujian porositas dilakukan untuk mengetahui persentase ruang kosong (pori) dari variasi ukuran butiran mortar. Pengujian dilakukan pada benda uji berbentuk kubus dengan ukuran 50 × 50 × 50 mm yang didiamkan pada suhu ruangan dengan umur

mortar 28 hari. Nilai porositas akan dibandingkan dengan hasil kuat tekan mortar dari keempat variasi pada umur mortar ke 28 hari. Hal ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara porositas dan kuat tekan keempat variasi mortar tersebut. Hasil perbandingan ini dapat dibuat grafik perbandingan porositas dan kuat tekan mortar yang dapat dilihat pada Gambar 8.

Pada grafik ditunjukkan bahwa semakin tinggi nilai porositas maka semakin rendah nilai kuat tekannya. Kondisi ini sesuai dengan penelitian sebelumnya (Priastiwi *et al.*, 2020), dimana didapatkan bahwa mortar geopolimer beraktivator NaOH memiliki porositas yang tinggi namun memiliki kuat tekan yang rendah, sedangkan mortar geopolimer beraktivator Na_2SiO_3 memiliki porositas yang rendah namun memiliki kuat tekan yang tinggi.



Gambar 8. Korelasi porositas dan kuat tekan

Hasil temuan ini sejalan dengan penelitian (Sanchez *et al.*, 2024) yang menyatakan ada hubungan terbalik yang konsisten antara porositas dan kekuatan tekan. Ketika porositas meningkat, kekuatan tekan menurun. Tingginya nilai porositas pada mortar memang berkontribusi terhadap penurunan kuat tekan, karena pori-pori yang ada berfungsi sebagai area kosong yang lemah dalam struktur, sehingga mengurangi luas penampang efektif untuk menahan beban. Selain itu, keberadaan air bebas dalam mortar juga dapat menyebabkan efek pelunakan, yang lebih parah pada mortar berporositas tinggi, mengakibatkan pembentukan retakan baru dan penurunan kekuatan kompresi (Zhang *et al.*, 2021). Oleh karena itu, pengelolaan porositas sangat penting dalam desain material untuk memastikan keseimbangan antara kekuatan dan fungsi, seperti dalam aplikasi beton pervious yang memerlukan porositas tinggi untuk permeabilitas air. Sebaliknya, nilai porositas yang rendah berarti struktur lebih padat, sehingga luas

penampang efektif lebih besar dan mampu menahan beban lebih tinggi, sehingga kuat tekannya meningkat.

Kesimpulan

Secara umum, ukuran agregat yang lebih besar dapat meningkatkan kekuatan tekan karena pemadatan yang lebih baik dan pengurangan rongga. Pengaruh ukuran butiran maksimum agregat halus terhadap kuat tekan mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih didapatkan hasil kuat tekan tertinggi yaitu terdapat pada variasi GT 1,18 mm dengan nilai kuat tekan rata-rata 31,76 MPa pada hari ke-28 yang dikategorikan sebagai mortar yang paling kuat yaitu tipe M, namun demikian ukuran butir maksimum yang terlalu kecil mudah rapuh seiring dengan bertambahnya umur mortar. Ukuran butir maksimum yang lebih besar dari 1,18 mm (ukuran 4,75 mm dan 2,36 mm) meskipun memiliki kekuatan tekan lebih rendah namun memiliki ketahanan yang lebih baik dengan kekuatan yang cenderung stabil

Mortar GT 2,36 memiliki nilai absorpsi yang rendah sehingga memiliki tingkat keawetan yang tinggi dan berpengaruh terhadap hasil densitas dimana semakin kecil nilai absorpsi maka semakin besar nilai densitasnya karena akan menghasilkan ikatan antar partikel yang semakin kuat dan rongga udara dalam mortar semakin mengecil. Nilai porositas mortar GT 4,75 memiliki nilai porositas terbaik karena menggunakan gradasi agregat yang baik campurannya termasuk agregat yang lebih kasar hingga agregat halus dan menghasilkan nilai porositas yang minimum.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Indonesia yang telah memberikan support biaya penelitian melalui Riset Strategis 2025 dan seluruh pihak laboratorium Bahan dan Konstruksi Teknik Sipil Universitas Diponegoro yang telah membantu keberlangsungan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Afif, A. & Akbar Bale, H. (2019) 'Pengaruh Abu Batu Sebagai Substitusi Agregat Halus Dan Penambahan Superplasticizer Terhadap Karakteristik Beton Mutu Tinggi'.
- ASTM C 33/M (2023). Standard Specification for Coarse Aggregate, *American Society for Testing and Materials*, 08(Reapproved 1989), pp. 3–4. Available

at: <https://doi.org/10.1520/C0033>.

ASTM C270, C. 270 (2024) *ASTM C270-Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*.

ASTM C642-21 (2021) 'Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete 1', pp. 1–3.

Badan Standardisasi Nasional (2002) Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung. SNI 03-2847-2002, *Bandung: Badan Standardisasi Nasional*, p. 251.

Darvishvand, H.R., Haj Seiyed Taghia, S.A. and Ebrahimi, M. (2021) 'The effect of size and shape of aggregate on compressive strength and ductility of concrete', *Cement*, 2021(1), pp. 46–54. Available at: <https://doi.org/10.32047/CWB.2021.26.1.5>.

Feng, H., Wang, Z., Sheikh, M. N., Zhao, X., Gao, D., & Hadi, M. N. (2019). The effect of nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, and nano-Fe₂O₃ on the compressive strength and workability of magnesium phosphate cement-based mortar. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(3), 192-208.
<https://doi.org/10.1520/ACEM20190014>.

Hanif, A. and Bima (2022) *Studi Perbandingan Ketahanan Mortar Geopolimer dan Mortar dengan Semen Portland Pozzolan (PPC) dalam Rendaman Air Laut*.

Hunggurami, E., Simatupang, P. and Lori, A. (2015) Studi Kelayakan Penggunaan Tanah Putih Sebagai Pengganti Agregat Halus (Pasir) Terhadap Kualitas Beton, *Jurnal Teknik Sipil Nusa Cendana*, 4(1), 29–38. Available at: <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.29125.09440>.

Jiang, Z., Cai, G., Tian, G., & Liu, X. (2022). Effect of aggregate particle size on mortar pore structure. *Construction and Building Materials*, 352, 128988.

Karadumpa, C. S., & Pancharathi, R. K. (2022). Influence of gradation of aggregates using particle packing methods on strength and microstructure of blended cement mortars. *Materials Today: Proceedings*, 61, 174-186.

Kushartomo, W., Linggasari, D., & Sutandi, A. (2020). Efek Ukuran Butiran Maksimum terhadap Nilai Modulus of Rupture Reactive Powder Concrete. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(1), 1-8.

Li, R. J., Zhu, Z. G., Yao, X. H., & Zhang, X. Y. (2013). Study on effect of different fine aggregates on properties of dam concrete. *Applied Mechanics and Materials*, 438, 174-178.

Ma, J., Wang, J. and Xu, K. (2021). Study on Physicochemical Properties of Fly Ash of Low-low Temperature Electrostatic Precipitator', *Zhongguo Dianji Gongcheng Xuebao*, 41(10), pp. 3454–3465. Available at: <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201375>.

Maroszek, M., Rudziewicz, M., Shah, S. M. A., Tran, D. H., & Hebda, M. (2025). Development of Eco-Friendly Construction Materials for 3D Printing Using Fly Ash and Demolition Waste. *Buildings*, 15(21), 3988.
<https://doi.org/10.3390/buildings15213988>.

Mehmetoğlu, E., Güneşli, H. and Karahan, S. (2020) The effect of gradation and grain-size properties of fine aggregate on the building mortars, *Production Engineering Archives*, 26(3), pp. 121–126. Available at: <https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.23>.

Nurmalita, N., Abdulmajid, S. N., Setiawan, A., Idroes, R., & Jalil, Z. (2023). Characteristics of silica powder extracted from fly ash of coal fired power plant–effect of heat treatment process. *Journal of Ecological Engineering*, 24(9), 282–292.
<https://doi.org/10.12911/22998993/169289>.

Orozco, C., Tangtermsirikul, S., Sugiyama, T., & Babel, S. (2023). Examining the endpoint impacts, challenges, and opportunities of fly ash utilization for sustainable concrete construction. *Scientific Reports*, 13(1), 18254.
<https://doi.org/10.1038/s41598-023-45632-z>.

Ozcelik, Y., & Ozguven, A. (2014). Water absorption and drying features of different natural building stones. *Construction and building materials*, 63, 257-270.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.030>.

Priastiwi, Y. A., Hidayat, A., Daryanto, D., & Badru, Z. S. (2020). Pengaruh Substitusi Tanah Putih pada Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Aktifator Natrium Hidroksida. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(1), 9-16.

Rutkowska, G., Chalecki, M. and Żółtowski, M. (2021). Fly Ash from Thermal Conversion of Sludge as a Cement Substitute in Concrete Manufacturing,

Sustainability, 13(8).

<https://doi.org/10.3390/SU13084182>.

Sanchez, C.M., Juan, J.G., and Martinez, I. (2024). Relationship between density, porosity, compression strength and permeability in porous concrete: Optimization of properties through the water cement ratio and aggregate type, *Journal of Building Engineering*, 68, 97. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110858>.

Song, X.F., Wei, J.F. and He, S.T. (2008). A novel method to improve sulfate resistance of concrete by surface treatment with super-absorbent resin synthesised in situ, *Magazine of Concrete Research*, 60(1). <https://doi.org/10.1680/MACR.2007.00051>.

Syaputra, D. A., Nugroho, F. R., Lie, H. A., & Purwanto, P. (2018). Studi experimental pengaruh perbedaan molaritas aktivator pada perilaku beton geopolimer berbahan dasar fly ash. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 7(1), 89-98.

Tian, Y., Bourtsalas, A. T., Kawashima, S., & Themelis, N. J. (2023). Using waste-to-energy fine-combined ash as sand or cement substitute in cement mortar. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(11), 04023378. <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-15684>.

Xie, N., Shi, X., Dang, Y., & Pace, A. (2015).

Upcycling of waste materials: Green binder prepared with pure coal fly ash. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(3), 04015138.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001414](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001414).

Yoon, J., Jafari, K., Tokpatayeva, R., Peethamparan, S., Olek, J., & Rajabipour, F. (2022). Characterization and quantification of the pozzolanic reactivity of natural and non-conventional pozzolans. *Cement and Concrete Composites*, 133, 104708. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.10470>.

Zhang, X., Chiu, Y. W., Hao, H., & Cui, J. (2021). Free water effect on the dynamic compressive properties of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103933. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2021.103933>.

Zhao, J., Wang, Z., Li, G., & Lu, S. (2025). Optimizing high-volume fly ash mortar with nano-SiO₂ and PVA fibers: performance and microstructure. *Nanomaterials*, 15(11), 837. <https://doi.org/10.3390/nano15110837>.

Zhuang, Z., Mu, S., Guo, Z., Liu, G., Zhang, J., & Miao, C. (2024). Diffusion-reaction models for concrete exposed to chloride-sulfate attack based on porosity and water saturation. *Cement and Concrete Composites*, 146, 105378. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.10537>.