

Pengaruh Substitusi Tanah Putih pada Mortar Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* dengan Aktifator Natrium Hidroksida

*Yulita Arni Priastiwi, Arif Hidayat, D. Daryanto, Z. Salamsyah
Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang,
*yulita_tiw@gmail.com

Received: 31 Juli 2019 Revised: 24 Januari 2020 Accepted: 6 Februari 2020

Abstract

The presence of white soil in a geopolymer mortar affects the physical and mechanical properties of the mortar itself, especially in compressive strength, density and modulus of elasticity produced. Geopolymer mortar composed of fly ash, sand, water, and NaOH which acts as an alkaline activator compared to mortar from the same material, but white soil from Kupang is added as a substitution of fly ash. Specimens are made in six variations. Geopolymer mortar composers using a ratio of 1 binder: 3 sand with w/b of 0.5. Binder composed of fly ash with white soil substitution of 0; 5; 10; 15; 20 and 30% by weight of fly ash. An activator NaOH 8M solution was added to the mixture. Both white soil and fly ash pass of sieve no. 200 with a moisture content of 0%. Mortar made measuring 5x5x5 cm. The mortar was treated by the oven of method at 60 °C for 24 hours until the mortar does not change in weight. The test results show geopolymer mortar with 15% substitution of white soil to fly ash has the highest compressive strength, density and modulus of elasticity among other variations. In all mortar variations, compressive strength at 14 days has reached 75% of strength at 28 days.

Keywords: *Geopolymer, mortar, white soil*

Abstrak

Keberadaan tanah putih pada campuran mortar geopolimer mempengaruhi sifat fisik dan mekanik mortar itu sendiri, terutama ditinjau dari kuat tekan, kerapatan dan modulus elastisitas yang dihasilkan. Mortar geopolimer yang tersusun atas fly ash, pasir, air, serta NaOH yang berperan sebagai alkaline aktifator dibandingkan dengan mortar geopolimer berbahan sama, namun ditambahkan tanah putih dari Kupang sebagai substitusi dari fly ash dengan persentase tertentu. Spesimen dibuat dalam enam variasi proporsi campuran. Penyusun mortar geopolimer menggunakan perbandingan 1 binder: 3 pasir dengan faktor air (w/b) sebesar 0,5. Binder tersusun atas fly ash dengan substitusi tanah putih sebesar 0; 5; 10; 15; 20 dan 30% dari berat fly ash. Larutan aktivator NaOH 8M ditambahkan dalam campuran. Baik tanah putih maupun fly ash menggunakan ukuran lolos saringan no. 200 dengan kadar air 0%. Spesimen mortar dibuat berukuran 5x5x5 cm. Perawatan mortar dilakukan setelah dilepas dari cetakan dengan metode pengovenan disuhu 60 °C selama 24 jam sampai mortar tidak mengalami perubahan berat. Hasil pengujian menunjukkan mortar geopolimer dengan substitusi 15% tanah putih terhadap fly ash mempunyai kuat tekan, kerapatan dan modulus elastisitas tertinggi diantara variasi lainnya. Pada semua variasi mortar, kekuatan saat umur 14 hari telah mencapai 75% kekuatan penuhnya saat 28 hari.

Kata kunci: *Geopolimer, mortar, tanah putih*

Pendahuluan

Penggunaan semen di bidang infrastruktur sangat berpengaruh bagi kondisi udara kita. Hal itu disebabkan pada saat produksi dan penggunaan semen untuk konstruksi menghasilkan karbon dioksida (CO₂). CO₂ turut menjadi penyumbang

terbesar dari efek rumah kaca. Produksi semen berperan meningkatkan efek rumah kaca sebesar 6% pada tahun 1988 hingga tahun 2010 (Ariffin *et al.*, 2011). Oleh karena itu diperlukan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan semen. Bahan geopolimer diharapkan dapat mengurangi efek rumah kaca dari produksi dan

penggunaan semen. Geopolimer sendiri merupakan material/bahan yang mengandung banyak unsur-unsur silika dan alumina. Unsur-unsur ini banyak didapati pada material buangan hasil sampingan industry seperti *fly ash*, *blas furnace*, *slag*, *puzzolan* dan lain-lain. Bahan geopolimer dapat difungsikan sebagai pengikat bila ditambahkan dengan alkalin aktifator (Davidovits, 2015). Beberapa tahun terakhir di Indonesia telah mulai banyak dikembangkan penelitian-penelitian mengenai material geopolimer ini dengan material buangan yang berbeda-beda diantaranya pencampuran antara *fly ash* dan abu sawit (Islami *et al.*, 2015), penggunaan *fly ash* dari Paiton dengan aktifator campuran NaOH dan Na_2SiO_3 (Ekaputri & Damayanti., 2007)

Pada penelitian ini akan dibuat mortar geopolimer dengan memanfaatkan *fly ash*, yang merupakan buangan/limbah pabrik pengolahan batu bara Tanjung Jati Jepara dicampur dengan NaOH sebagai alkali aktifator. Selain *fly ash* akan ditambahkan pula bahan alami alam berupa tanah putih yang berasal dari Kupang, Nusa Tenggara Timur sebagai substitusi dari *fly ash* dengan komposisi tertentu. Penggunaan limbah batu bara selain mengurangi produksi CO_2 akibat penggunaan semen, juga akan mengurangi pencemaran lingkungan akibat penumpukan *fly ash* yang menyebar di lingkungan. Komposisi dari *fly ash* bersifat seperti *portland cement* yaitu bersifat *pozzolan*, mengandung banyak unsur silika dan alumina.

Fly ash menurut ASTM C618 (2010) tersusun atas material SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO, MgO, SO_3 , dan dibagi menjadi tiga jenis yaitu:

Kelas C

Fly ash yang mengandung CaO di atas 10% yang dihasilkan dari pembakaran *lignite* atau sub-bitumen batubara (batubara muda). Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 50%, dan kadar CaO mencapai 10%.

Kelas F

Fly ash yang mengandung CaO lebih kecil dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran *anthracite* atau bitumen batubara. Kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) > 70%, kadar CaO < 5%.

Kelas N

Pozzolan alam atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain tanah *diatomic*, *opaline chert*, *shales*, *tuff*, dan abu vulkanik, yang biasa diproses melalui pembakaran atau tidak melalui

proses pembakaran. Selain itu juga mempunyai sifat *pozzolan* yang baik.

Fly ash yang digunakan pada penelitian berasal dari PLTU Tanjung Jati B, Jepara. Kandungan unsur kimia pada *fly ash* ini menurut Tricya dan Ferina (2017) memiliki total kandungan SiO_2 , Al_2O_3 , dan FeO adalah 83,28%, sehingga dapat digolongkan pada kelas F (ASTM C618, 2010). Secara lengkap kandungan dari *fly ash* dari PLTU Tanjung Jati B Jepara ditampilkan pada Tabel 1.

Selain *fly ash*, material lain yang perlu diketahui dalam penelitian ini adalah tanah putih. Tanah putih merupakan batuan yang telah mengalami perubahan komposisi kimia yang disebabkan oleh pelapukan dan pengaruh kondisi air bawah tanah. Bahan galian ini berwarna putih kekuningan hingga putih kecoklatan, kompak, padu dan agak sulit digali dengan alat sederhana.

Tabel 1. Kandungan oksida *fly ash* PLTU Tanjung Jati B Jepara

Kandungan oksida	Persentase (%)
Na_2O	1,59
MgO	2,86
Al_2O_3	24,95
SiO_2	46,52
SO_3	1,13
K_2O	2,77
CaO	5,89
TiO_2	1,36
FeO	11,81
CuO	1,12

Sumber: Tricya dan Ferina, 2017

Tanah putih memiliki bahan penyusun kimia yaitu SiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO, MnO, MgO, CaO, Na_2O , K_2O , TiO_2 , SO_3 (Hunggurami *et al.*, 2015). Tanah putih memiliki prosentase oksida tertinggi berupa kalsium oksida (CaO) sebesar 56,19%. Hal ini menunjukkan bahan penyusun kimia tanah putih didominasi oleh kalsium.

Dalam bentuk senyawa kimia, hasil pengujian X-Ray Diffraction (XRD) tanah putih tersusun dari *Magnesium Calcium Carbonate* (MgCaCO_3) sebesar 52% dan *Magnesium Phosphate* ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$) sebesar 48% (Parhulutan *et al.*, 2018). Penggunaan tanah putih sebagai substitusi *fly ash* pada mortar geopolimer diharapkan dapat memberi pengaruh positif pada sifat fisik maupun mekanik yang terkait dengan kekuatan tekan dari mortar itu sendiri.

Dalam bidang struktur bangunan, salah satu parameter penting dari mortar yaitu kuat tekan.

ASTM C270 (2004) mengklasifikasikan kuat tekan mortar berdasarkan penggunaannya dalam empat jenis yaitu:

1. *Type* mortar M, *Type* mortar M adalah campuran mortar dengan kekuatan tekan tinggi. Mortar tipe ini cocok digunakan untuk pasangan baik yang bertulang maupun tidak bertulang yang menerima beban tekan yang besar. Kuat tekan minimumnya adalah 17,2 MPa.
2. *Type* mortar S, *Type* mortar S merupakan campuran dengan kekuatan tekan tingkat sedang. Mortar ini direkomendasikan untuk struktur yang akan menahan beban tekan yang tidak terlalu besar. *Type* mortar S ini memiliki keawetan yang tinggi sehingga direkomendasikan untuk struktur yang berkaitan dengan tanah seperti dinding penahan tanah, pondasi, perkerasan, saluran pembuangan dan lain - lain. Kuat tekan minimumnya adalah 12,4 MPa.
3. *Type* mortar N, *Type* mortar N adalah mortar yang biasa digunakan untuk konstruksi yang menahan beban tekan yang kecil. *Type* mortar ini cocok untuk dinding penahan beban interior maupun eksterior. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.
4. *Type* mortar O, *Type* mortar O merupakan mortar dengan kekuatan tekan yang rendah. Mortar tipe ini dipakai untuk bangunan dinding yang tidak menahan beban yang tidak lebih dari 0,7 MPa dan terhindar dari pengaruh cuaca. Kuat tekan minimumnya adalah 2,4 MPa.

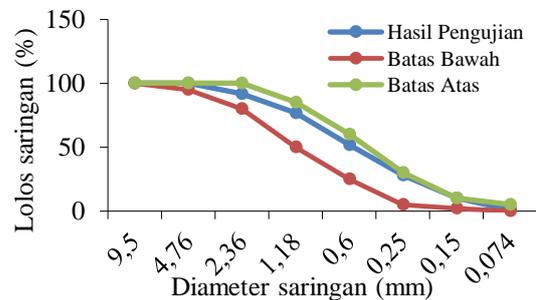
Metode Penelitian

Material

Mortar yang dibuat dalam skala laboratorium dan akan dipergunakan untuk mengetahui sifat-sifat spesimen harus terdiri dari bahan-bahan penyusun dalam susunan campuran yang sesuai dengan spesifikasi, seperti ukuran butir yang dipergunakan. Pasir sesuai syarat agregat halus ASTM C33 (2013) yaitu maksimum berdiameter 4,76 mm dan minimum 0,074 mm. Dalam penelitian ini pasir yang dipergunakan adalah pasir lokal ex.Muntilan dengan susunan gradasi seperti ditampilkan dalam Gambar 1 dengan nilai modulus kehalusan (*fineness modulus*) sebesar 2,42 dan kandungan lumpur setelah dilakukan proses pencucian 0,76%. Dalam kondisi kering permukaan (*Saturated Surface Dry, SSD*) berat jenis pasir Muntilan adalah 2,46 dengan

penyerapan air (*water absorption*) sebesar 0,3%. Dalam penelitian ini material *fly ash* dan tanah putih yang merupakan bahan penyusun binder dikondisikan berdiameter kurang dari 0,075 mm dan memiliki kadar air hingga 0%.

Dalam kondisi asli, baik *fly ash* dan tanah putih masih berupa gumpalan-gumpalan berbutir besar dan tidak kering sehingga harus dihaluskan dan dikeringkan terlebih dahulu hingga memenuhi persyaratan yang ditentukan. Proses penghalusan dan penyaringan dilakukan secara manual, sedangkan pengeringan dilakukan dengan sistem pengovenan sehingga baik *fly ash* maupun tanah putih benar-benar kering dengan kadar air mendekati 0%. Setelah *fly ash* dan tanah putih lolos saringan 0,074 mm (saringan no. 200) dan kering sempurna, baru dipergunakan sebagai bahan utama binder geopolimer. Kondisi *fly ash* dan tanah putih sebelum dan sesudah proses penghalusan ditampilkan dalam Gambar 2.



Gambar 1. Analisa saringan pasir Muntilan

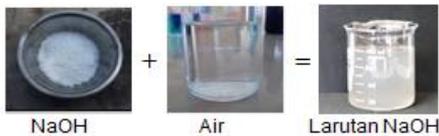


Gambar 2. (a) & (b) Kondisi asli *fly ash* dan tanah putih, (c) & (d) kondisi setelah dihaluskan

Suatu zat aktifator diperlukan untuk mengikat agregat dalam mortar karena baik *fly ash* maupun tanah putih pada dasarnya tidak memiliki kemampuan mengikat seperti semen. *Natrium hidroksida* (NaOH) atau yang lebih dikenal dengan soda api dipakai sebagai aktifator dalam penelitian

ini. NaOH berperan untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terdapat dalam *binder* sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat (Hardjito & Rangan, 2005). Bila aktifator yang dipergunakan masih berupa padatan, maka harus dilarutkan ke dalam air disesuaikan dengan molaritas larutan aktifator yang dikehendak (Davidovits, 2015).

NaOH yang berbentuk serpihan-serpihan putih akan dicampur dengan air menjadi larutan NaOH dan digunakan sebagai aktifator dalam campuran *fly ash* dan tanah putih menjadi *binder* geopolimer. Syaputra *et al.*, (2018) menunjukkan bahwa pada beton geopolimer dengan konsentrasi larutan NaOH 8M menghasilkan kuat tekan tertinggi diantara konsentrasi lainnya, sehingga dalam penelitian ini konsentrasi larutan NaOH 8M yang dipergunakan sebagai aktifator mortar geopolimer. Proses pencampuran NaOH menjadi larutan NaOH ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Pembuatan larutan NaOH 8M

Pembuatan spesimen

Dalam penelitian ini dibuat spesimen mortar dengan enam variasi, dengan benda uji berupa kubus berukuran 5x5x5 cm³. Keenam variasi berupa substitusi tanah putih terhadap berat *fly ash* sebesar 0, 5, 10, 15, 20, dan 30%. Jumlah spesimen untuk tiap variasi berjumlah tiga buah untuk masing-masing pengujian yang dilakukan.

Proporsi mortar geopolimer menggunakan perbandingan 1Pca: 3Ps. Pca merupakan *binder* berupa gabungan dari tanah putih, dan *fly ash*, sedangkan Ps merupakan pasir. Nilai faktor air *binder* (w/b) yang digunakan adalah 0,5. Nilai ini didapatkan dari *trial and error* pengujian sebelumnya. Komposisi campuran mortar secara lengkap ditunjukkan pada Tabel 2, dan untuk perhitungan molaritas didasarkan pada perhitungan komposisi bahan material:

- Proporsi campuran mortar = 1Pca : 3Ps dengan faktor air *binder* sebesar 0,5
- Pca (tanah putih + *fly ash*) = 3 kg, maka Ps (pasir) = 9 kg
- Faktor air *binder* = 0,5 * 3 kg = 1,5 kg
- Perhitungan molaritas NaOH dengan rencana NaOH 8 M
Molaritas = 8 Molar

Air = 1,5 kg = 1,5 liter = 1500 ml

Mr NaOH = 40 gr/mol (jumlah dari Ar,

Na = 23, O = 16 dan H = 1)

$$M = \frac{\text{berat NaOH}}{Mr} \times \frac{1000}{V \text{ air}}$$

$$8 = \frac{\text{berat NaOH}}{40} \times \frac{1000}{1500}$$

Berat NaOH = 480 gram

di mana M merupakan molaritas (Mol/L), V merupakan volume larutan (ml) dan Mr merupakan massa molekul relatif (gram/mol).

Tabel 2. Komposisi mortar geopolimer

No	Tanah putih (kg)	<i>Fly ash</i> (kg)	Pasir (kg)	Air (kg)	Keterangan substitusi tanah putih terhadap <i>fly ash</i>
1	0,00	3,00	9,00	1,50	0%
2	0,15	2,85	9,00	1,50	5%
3	0,30	2,70	9,00	1,50	10%
4	0,45	2,55	9,00	1,50	15%
5	0,60	2,40	9,00	1,50	20%
6	0,90	2,10	9,00	1,50	30%

Proses dilanjutkan dengan menimbang kristal NaOH sebesar 480 gram dan menambahkan air bersih sebesar 1,5 liter, diaduk ± 3 menit hingga larut. Reaksi dari pencampuran tersebut akan menghasilkan panas, maka tutup wadah yang berisi larutan untuk menghindari penguapan dan tunggu sampai larutan dingin. Tuang pasir, *fly ash*, dan tanah putih sesuai dengan berat masing-masing campuran ke dalam *mixer* dan putar hingga tercampur merata sekitar 2 menit, kemudian larutan NaOH 8M dituang ke dalam *mixer*. Adonan yang sudah tercampur merata siap dicetak dalam cetakan berukuran 5x5x5 cm³ yang sebelumnya telah dilumasi dengan oli supaya tidak lengket sewaktu dibuka. Penuangan adukan ke dalam cetakan dilakukan dua kali lapisan dan ditiap lapisan dilakukan pemadatan dengan cara ditusuk-tusuk sebanyak 25x dan diratakan. Adukan mortar geopolimer yang telah dicetak seperti terlihat pada Gambar 4. Spesimen dibongkar setelah 24 jam, dilanjutkan proses *curing* oven pada suhu 60 °C selama waktu 24 jam.



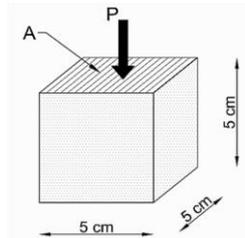
Gambar 4. Spesimen mortar

Pengujian mortar geopolimer

Kekuatan tekan mortar

Kekuatan tekan merupakan kemampuan mortar menerima gaya tekan per satuan luas. Untuk mendapatkan nilai kuat tekan mortar dengan varian berbeda, perhitungan kuat tekan mortar menggunakan Persamaan 1.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (1)$$



Gambar 5. Gaya dan luasan mortar

Di mana $f'c$ merupakan kuat tekan mortar (MPa), P merupakan beban maksimum total (N), dan A merupakan luas permukaan (mm^2)

Pengujian kuat tekan mortar dilakukan dengan menggunakan alat uji tekan (*Compression Apparatus*) dengan metode pengujian mengacu pada SNI 03-6825-2002 (BSN 2002b) mengenai Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland untuk Pekerjaan Sipil. Alat uji tekan dan penempatan spesimen mortar ditunjukkan pada Gambar 6 dan 7.



Gambar 6. Alat uji tekan mortar

Berat volume mortar

Kerapatan (berat volume) mortar merupakan perbandingan antara berat mortar dan volume dari mortar tersebut, seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.

$$\gamma_m = W_m / V_m \quad (2)$$

di mana γ_m merupakan berat volume (kg/m^3), W_m merupakan berat mortar (kg) dan V_m merupakan volume mortar (m^3)

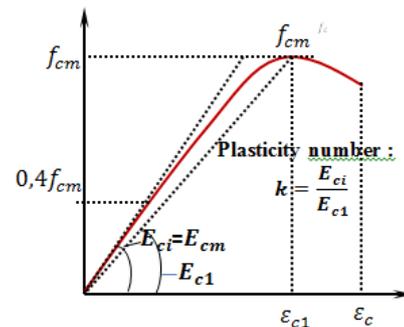


Gambar 7. Perletakan spesimen

Modulus elastisitas mortar

Modulus elastisitas merupakan suatu angka yang digunakan untuk mengukur objek atau ketahanan bahan untuk mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada benda itu. Pada beton nilai modulus elastisitas tergantung pada umur beton, sifat-sifat agregat maupun semen, kecepatan pembebanan, dan jenis serta ukuran dari benda uji.

Dalam Gambar 8, besaran nilai modulus elastisitas dinyatakan dalam E_{ci} . Modulus elastisitas merupakan kemiringan dari kurva tegangan-regangan di wilayah deformasi elastis (fib-CEB- -regangan untuk pembebanan tekan uniaksial. Kemiringan kurva saat $0,4 f_{cm}$ dijadikan untuk penentuan modulus elastisitas mortar geopolimer.



Sumber: fib,2008

Gambar 8. Perletakan spesimen

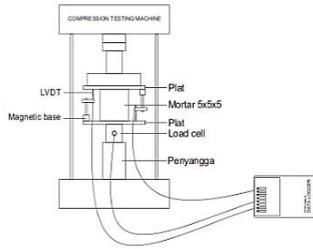
Nilai regangan (ϵ) yang terjadi pada benda uji dapat dihitung dengan Persamaan 3, sedangkan tegangan (f_c) dengan Persamaan 1.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3)$$

di mana ΔL merupakan perubahan panjang (mm), L merupakan panjang mula – mula yaitu jarak antara dua ring (mm).

Pengujian modulus elastisitas dilakukan dengan menggunakan tambahan alat berupa *Linear Variabel Differential Transformer* (LVDT). Alat LVDT merupakan sensor yang membaca regangan melalui pergeseran inti magnet. Pengujian modulus

dilakukan saat mortar berumur 28 hari dengan *set up* pengujian ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. *Set up* pengujian



Gambar 10. Pengujian modulus elastisitas

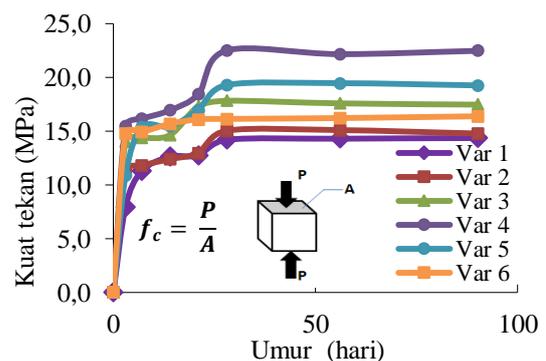
Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian pada spesimen mortar menunjukkan secara visual mortar geopolimer hampir menyerupai mortar semen biasa, hanya warna sedikit lebih gelap. Adanya substitusi tanah putih ke dalam campuran *fly ash* tidak banyak berpengaruh dalam hal warna mortar yang dihasilkan. Sebelum dilakukan pengovenan, secara visual mortar terlihat lemah, namun setelah dilakukan pengovenan dalam suhu 60°C selama 24 jam mortar tampak lebih kokoh. Pengujian tekan dilakukan saat mortar berumur 3, 7, 14, 21, 28, 56 dan 90 hari. Sebelum dilakukan pengujian tekan tiap spesimen diukur dan ditimbang terlebih dahulu untuk mengetahui berat dan volumenya dan akan dipergunakan untuk mengetahui kerapatannya. Data yang ditampilkan dalam grafik dan kurva merupakan nilai rata-rata dari ketiga spesimen pada setiap variasi substitusi tanah putih. Gambar 11 dan 12 serta Tabel 3 menunjukkan hubungan antara kuat tekan mortar dengan umur pengujiannya.

Kuat tekan mortar geopolimer dengan enam variasi seperti dalam Gambar 11 dan Tabel 3 menunjukkan bahwa disemua mortar yang diberi substitusi tanah putih mengalami peningkatan kuat tekan dengan pola peningkatan yang hampir sama dan setelah umur 28 hari kurva di semua variasi cenderung stabil. Kurva menunjukkan mortar variasi ke empat (substitusi tanah putih 15%) menghasilkan kuat tekan paling tinggi di semua umur pengujiannya diantara variasi lainnya yaitu

22,55 MPa saat umur 28 hari, disusul berturut-turut variasi 5 (substitusi 20%) sebesar 19,29 MPa, variasi 3 (substitusi 10%) sebesar 17,84 MPa, variasi 6 (substitusi 30%) sebesar 16,13 MPa, variasi 2 (substitusi 5%) sebesar 15,03 MPa dan variasi 1 yang merupakan mortar tanpa tanah putih sebesar 14,21 MPa. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa adanya substitusi tanah putih pada campuran mortar geopolimer berpengaruh meningkatkan kekuatan tekan mortar, namun jumlahnya tidak melebihi 15% dari berat *fly ash*-nya. Proporsi yang berlebih dari tanah putih justru akan menurunkan kekuatan tekan mortar. Adanya tanah putih dalam campuran mortar membuat kekuatan awal mortar menjadi lebih tinggi dibandingkan mortar tanpa substitusi tanah putih, dan saat umur mortar 14 hari kekuatan mortar sudah lebih dari 75% kekuatan maksimalnya baik pada mortar dengan tanah putih maupun pada mortar tanpa tanah putih. Pada seluruh variasi terlihat bahwa peningkatan kekuatan secara signifikan terjadi saat mortar berumur kurang dari 28 hari, dan sebaliknya di atas umur 28 hari peningkatan kekuatan sudah tidak terlalu signifikan. Bila kuat tekan pada umur-umur pengujiannya dibandingkan terhadap umur 28 hari, akan tampak seperti pada Tabel 4 dan Gambar 12. Pada Tabel 4 dan Gambar 11 ditunjukkan bahwa bila umur mortar 28 hari dianggap sebagai kondisi dengan 100% kekuatan mortar maka saat umur tiga hari seluruh mortar telah mencapai lebih dari 50% kekuatannya, bahkan pada variasi enam (substitusi tanah putih 30%) telah mencapai 92%, paling cepat dibanding variasi lainnya.

Saat umur mortar 14 hari, semua variasi telah mencapai minimal 75% kekuatannya dan terlihat variasi 4 memiliki nilai terendah diantara variasi lainnya yang telah lebih dari 75%. Saat umur mortar 21 hari pada seluruh variasi telah mencapai lebih dari 80% kekuatannya, dan pada variasi 6 telah mencapai kekuatan 100%. Setelah mortar berumur 28 hari, rata-rata mortar geopolimer tidak lagi banyak mengalami perubahan kekuatan tekan dan cenderung stabil.



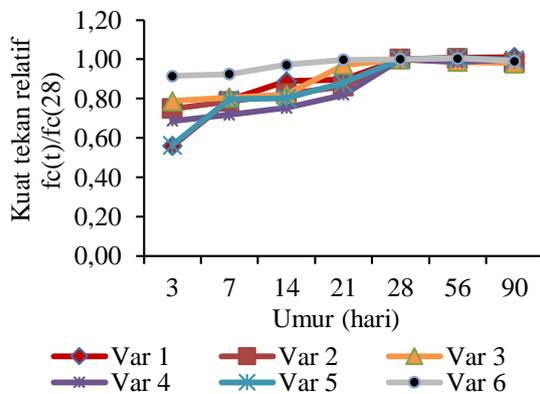
Gambar 5. Grafik kuat tekan

Tabel 3. Kuat tekan mortar

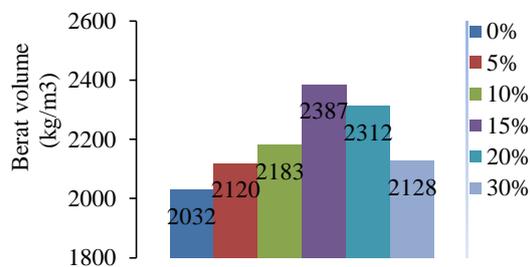
Kekuatan mortar geopolimer (MPa)							
	Umur						
	3	7	14	21	28	56	90
Var 1	7,95	11,29	12,63	12,75	14,21	14,32	14,38
Var 2	11,24	11,79	12,38	12,97	15,03	15,08	14,76
Var 3	14,05	14,37	14,64	17,32	17,84	17,60	17,48
Var 4	15,45	16,16	16,96	18,46	22,53	22,19	22,50
Var 5	10,85	15,36	15,45	16,98	19,29	19,46	19,26
Var 6	14,76	14,91	15,66	16,09	16,13	16,20	15,97

Tabel 4. Kuat tekan *relative*

Perbandingan kekuatan mortar terhadap umur 28 hari							
	Umur						
	3	7	14	21	28	56	90
Var 1	0,56	0,79	0,89	0,90	1	1,01	1,01
Var 2	0,75	0,78	0,82	0,86	1	1,00	0,98
Var 3	0,79	0,81	0,82	0,97	1	0,99	0,98
Var 4	0,69	0,72	0,75	0,82	1	0,99	1,00
Var 5	0,56	0,80	0,80	0,88	1	1,01	1,00
Var 6	0,92	0,92	0,97	1,00	1	1,00	0,99



Gambar 6. Hubungan kuat tekan relatif dengan umur mortar



Gambar 7. Berat volume mortar pada berbagai substitusi tanah putih

Pengujian berat volume (kerapatan) pada mortar geopolimer ditunjukkan Gambar 12. Pada semua mortar geopolimer dengan variasi substitusi tanah putih menunjukkan berat volume mortar lebih dari 2000 kg/m³ dan substitusi tanah putih sebesar 15% memiliki nilai kerapatan paling tinggi diantara variasi lainnya. Adanya substitusi tanah putih

dalam campuran mortar berpengaruh meningkatkan berat volume mortar yang ditandai dengan nilai berat volume variasi 1 (tanpa tanah putih) bernilai paling rendah. Kerapatan mempengaruhi kekuatan tekan mortar, sehingga mortar dengan nilai kerapatan yang tinggi akan memiliki kekuatan tekan yang paling besar seperti pada mortar dengan substitusi tanah putih dalam mortar 15%.

Untuk modulus elastisitas pada mortar geopolimer seperti halnya pada modulus elastisitas beton akan berbeda-beda dan berubah-ubah menurut kekuatannya. Pengujian modulus elastisitas (E_{ci}) diperoleh dengan membandingkan nilai $0,4f_{cm}$ dengan nilai regangan saat $0,4f_{cm}$, di mana nilai f_{cm} diperoleh dari pengujian kuat tekan di umur 28 hari. Modulus elastisitas pada mortar geopolimer ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Modulus elastisitas mortar geopolimer

tanah putih %	f_{cm} MPa	$0,4f_{cm}$ MPa	$\epsilon_{0,4f_{cm}}$	$E_{ci} = \frac{f_{0,4f_{cm}}}{\epsilon_{0,4f_{cm}}}$
0	14,39	5,756	0,00940	612,35
5	14,98	5,992	0,00773	774,76
10	18,68	7,472	0,00873	855,85
15	23,03	9,214	0,00413	2.232,34
20	18,61	7,445	0,00469	1.585,69
30	17,09	6,838	0,00553	1.235,44

Nilai dari Tabel 5 menunjukkan bahwa mortar dengan substitusi tanah putih 15% memiliki

modulus elastisitas tertinggi diantara variasi lainnya, dengan nilai 2.232 MPa, sedangkan pada mortar tanpa substitusi tanah putih sebesar 612 MPa. Hal ini menunjukkan variasi 4 memiliki kekakuan lebih tinggi diantara mortar dengan variasi lainnya, namun demikian Tabel 5 juga memperlihatkan bahwa peningkatan substitusi tanah putih tidak linier dengan bertambahnya modulus elastisitas, yang ditunjukkan dengan menurunnya nilai modulus elastisitas pada substitusi 20% dan 30% tanah putih.

Kesimpulan

Substitusi tanah putih terhadap *fly ash* pada mortar geopolimer dapat meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer. Substitusi tanah putih dengan persentase 15% menghasilkan kuat tekan optimum mencapai 22,53 MPa saat umur 28 hari dibanding variasi lainnya. Bila dihubungkan dengan ASTM C270 (2004), maka termasuk mortar jenis M yang dapat dimanfaatkan untuk pasangan bertulang ataupun pasangan tidak bertulang yang memikul beban tekan yang besar. Pada semua variasi tanah putih dalam mortar geopolimer, saat umur 14 hari telah mencapai 75% kekuatan tekannya.

Substitusi tanah putih terhadap *fly ash* pada mortar geopolimer juga meningkatkan nilai modulus elastisitas serta kerapatan dari mortar geopolimer, di mana 15% tanah putih terhadap berat *fly ash* menghasilkan nilai rata-rata modulus elastisitas dan kerapatan yang terbesar. Namun demikian peningkatan jumlah tanah putih dalam campuran *fly ash* tidak linier dengan peningkatan kekuatan tekan, kerapatan, maupun modulus elastisitas mortar geopolimer dan persentase sebesar 15% dapat dianggap sebagai nilai maksimumnya.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada LPPM Universitas Diponegoro yang telah memberikan dana penelitian skim RPP (Riset Pengembangan dan Penerapan).

Daftar Pustaka

Ariffin, M. A. M., Hussin, M. W., & Bhutta, M. A. R. (2011). Mix design and compressive strength of geopolymer concrete containing blended ash from agro-industrial wastes. *Advanced Materials Research*, 339, 452-457.

ASTM C618. (2010). *Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan*

for use. ASTM International. US.

ASTM C270. (2004). *Standard specification for mortar for unit masonry*. ASTM International. US.

ASTM C33. (2013). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. US.

Davidovits, J. (2015). *Geopolymer chemistry and applications* (4th Ed.). Institute Geopolymere.

Ekaputri, J. J., & Damayanti, O. (2007). Sifat mekanik beton geopolimer berbahan dasar fly ash jawa power paiton sebagai material alternatif. *Jurnal Pondasi*, 13(2), 124-134.

Fib-CEB-FIP (2008). *Constitutive modelling of high strength/high performance concrete*. State of Art Report.

Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. Australia: Perth.

Hunggurami, E., Simatupang, P. H., & Lori, A. L. (2015). Studi kelayakan penggunaan tanah putih sebagai pengganti agregat halus (pasir) terhadap kualitas beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 4(1), 29-38.

Islami, A. N., Wibisono, M., & Saputra, E. (2015). Sifat-sifat Fisik Mortar Geopolimer dengan Bahan Dasar Campuran Abu Terbang (Fly Ash) dan Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash), *Doctoral Dissertation*, Riau, Indonesia: Riau Universitas

Parluhutan, S., Fernando, G., Purwanto, P., Y.A Priastiwi (2018). Studi kelayakan pemanfaatan campuran fly ash dan tanah putih sebagai semen alternatif. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 7(2), 283-288.

SNI 03-6825-2002. (2002). Metode pengujian kekuatan tekan mortar semen portland untuk pekerjaan sipil. badan standarisasi nasional. BSN, Indoneia: Jakarta.

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.

Tricya Y., & Ferina M. (2017). Studi Properties Beton Geopolimer Sebagai Substitusi Beton Konvensional, *Tugas Akhir*, Semarang, Indonesia: Universitas Diponegoro.