



Studi Perbandingan Sifat Mekanik Mortar PPC dan Mortar Geopolimer dengan Aktivator NaOH pada Rendaman Air Laut

Yulita Arni Priastiwi*, Arif Hidayat, Khotimatul Husna, Farah Naurah Putriagsari

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang

*yulitaarnipriastiwi@gmail.com

Received: 17 Mei 2023 Revised: 15 September 2023 Accepted: 21 September 2023

Abstract

Using Portland pozzolan cement (PPC) is considered suitable for infrastructure in the sea area because it has a high resistance to salt and sulfate but still produces carbon dioxide gas emissions that can damage the environment. Environmentally friendly materials that can completely replace cement are geopolymer materials. This study compared the mechanical properties of PPC mortar and geopolymer mortar with and without white soil under seawater bath conditions. The test object is a 5x5x5 cm mortar cube with fly ash, white soil, sand, water, alkaline activator NaOH 8M, and PPC cement. Mortar variations include PPC mortar, geopolymer mortar without white soil substitution (TTP), and 15% white soil substitution mortar (TP15%). Tests include compressive strength, tensile strength, porosity, density, and absorption for all three variations. Microstructure testing of the influence of the bath is carried out on the TP15% mortar. The test results showed that PPC mortar has better resistance compared to both variations of geopolymer mortar in terms of its compressive and tensile strength at a bath life of 28 days, namely 32,427 MPa and 2,318 MPa, while the geopolymer mortar produced maximum compressive and tensile strength values of 14,373 MPa and 0.993 MPa. TTP mortar has better resistance than TP15% mortar. Microstructure testing showed mortar with baths had a denser matrix.

Keyword: Geopolymer mortar, PPC, seawater, white soil, fly ash

Abstrak

Penggunaan semen portland pozzolan (PPC) dianggap cocok untuk infrastruktur di wilayah laut karena memiliki ketahanan yang tinggi terhadap garam dan sulfat, namun masih menghasilkan emisi gas karbon dioksida yang dapat merusak lingkungan. Bahan ramah lingkungan yang dapat menggantikan semen sepenuhnya adalah material geopolimer. Tujuan penelitian ini membandingkan sifat mekanis mortar PPC dan mortar geopolimer dengan dan tanpa tanah putih pada kondisi rendaman air laut. Benda uji berupa kubus mortar 5x5x5 cm dengan bahan meliputi fly ash, tanah putih, pasir, air, alkali aktivator NaOH 8M dan semen PPC. Variasi mortar terdiri dari mortar PPC, mortar geopolimer tanpa substitusi tanah putih (TTP), dan mortar substitusi tanah putih 15% (TP15%). Pengujian meliputi kuat tekan, kuat tarik, porositas, densitas, dan absorpsi untuk ketiga variasi. Pengujian mikrostruktur dari pengaruh rendaman dilakukan pada mortar TP15%. Hasil pengujian menunjukkan mortar PPC memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan kedua variasi mortar geopolimer ditinjau dari kuat tekan dan tariknya pada umur rendaman 28 hari yaitu 32.427 MPa dan 2.318 MPa, sedangkan pada mortar geopolimer menghasilkan nilai kuat tekan dan tarik maksimum sebesar 14.373 MPa dan 0,993 MPa. Mortar TTP memiliki ketahanan yang lebih baik dibandingkan mortar TP15%. Pengujian mikrostruktur menunjukkan mortar dengan rendaman memiliki matriks yang lebih padat.

Kata kunci: Mortar geopolimer, PPC, air laut, tanah putih, fly ash

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur di wilayah pesisir ataupun laut tidak dapat dipisahkan dari pengaruh air laut. Air laut umumnya mengandung 3,5%

larutan garam. Kandungan garam yang tinggi pada air laut dapat mengurangi tingkat kekuatan dan keawetan beton. Hal ini dikarenakan kandungan klorida (Cl) pada air laut termasuk garam yang sifatnya agresif terhadap bahan lain, termasuk

beton. Ion klorida dan sulfat meresap masuk ke dalam lapisan beton, sehingga terjadi reaksi kimia yang menyebabkan perubahan pada beton, dimana beton mengalami penurunan kekuatan yang diawali dengan timbulnya retakan di permukaan, kemudian mengalami spalling dan tulangnya mulai berkarat (Wedhanto, 2017).

Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan beton dengan mutu tinggi yang tahan di wilayah garam yang tinggi. Peran semen portland sangat penting dalam pembuatan beton konvensional. Namun penggunaan material konstruksi semen portland menjadi salah satu penghasil gas karbon dioksida terbesar. Gas ini menjadi bagian dari permasalahan lingkungan yaitu efek rumah kaca. Oleh karena itu diperlukan alternatif lain untuk pengganti semen portland yang dapat digunakan dalam pembuatan campuran beton guna mengurangi emisi gas karbon dioksida. Salah satu alternatif yang ada adalah dengan semen jenis PPC.

SNI 15-0302-2004 menyebutkan bahwa semen portland pozolan (PPC) adalah jenis semen hidrolis yang campuran homogennya terdiri dari semen portland dengan pozolan halus yang diproduksi dengan menggiling klinker semen portland dan pozolan menjadi satu, atau dengan mengaduk secara merata antara bubuk semen portland dan bubuk pozolan, atau gabungan antara menggiling dan mengaduk, dengan ketentuan komposisi pozolan 6% hingga 40% massa dari semen portland pozolan. Pozolan merupakan hasil alam yang sebagian besar mengandung unsur-unsur silikat dan alumina yang reaktif. Semen portland pozolan memiliki kelebihan dibandingkan dengan semen portland yaitu tingkat ketahanan yang tinggi terhadap garam dan asam sulfat sehingga cocok untuk bangunan konstruksi di wilayah laut/perairan, pengecoran massa, plesteran, konstruksi dekat pantai, dan pembuatan beton di keadaan yang agresif.

Namun demikian penggunaan semen portland pozolan belum signifikan mampu mengurangi gas karbon dioksida sehingga diperlukan alternatif lain yaitu dengan menggunakan material geopolimer. Geopolimer merupakan material pozolanik yang diperoleh dari reaksi ikat bahan yang mengandung banyak aluminium – silika. *Fly ash* menjadi salah satu pilihan bahan material geopolimer karena mengandung banyak unsur aluminium-silika. *Fly ash* diperoleh dari sisa pembakaran batu bara di PLTU yang berbentuk debu (Mehta, 2004).

Penggunaan *fly ash* dinilai dapat menurunkan pemanasan global dikarenakan emisi gas efek rumah kaca (karbon dioksida) yang dihasilkan 80% - 90% lebih rendah dari pada penggunaan semen

portland (Davidovits, 1994). Penggunaan *fly ash* tersebut sebagai salah satu material pembuatan beton maupun mortar geopolimer sudah banyak dilakukan pada penelitian-penelitian sebelumnya (Samadhi *et al.*, 2013), (Qomaruddin *et al.*, 2019), (Kaya *et al.*, 2020), (Li *et al.*, 2021) dan (Wu *et al.*, 2022)

Fly ash digunakan sebagai bahan dasar disubstitusikan dengan material lain, contohnya penggunaan *fly ash* dan tanah putih (Priastwi *et al.*, 2020), abu sekam padi (Wahyuni *et al.*, 2020), abu sawit (Edowinsyah & Firdaus, 2021), dan lain sebagainya. Penggunaan tanah putih yang berasal dari Kupang, Nusa Tenggara Timur yang digunakan untuk substitusi semen dikarenakan tanah putih kaya akan kalsium (Ca) dapat meningkatkan kuat tekan mortar geopolimer (Priastwi *et al.*, 2020).

Fly ash tidak memiliki kemampuan mengikat seperti semen portland, maka diperlukan alkalin aktivator yang dapat berupa larutan sodium hidroksida (NaOH) atau larutan potasium hidroksida (KOH) dan larutan sodium silikat (Na_2SiO_3) atau potasium silikat (K_2SiO_3) (Lloyd & Rangan, 2010). Larutan alkalin aktivator berfungsi untuk mengaktifkan reaksi polimerisasi dari unsur Al dan Si pada *fly ash*.

Studi mengenai penggunaan aktivator Potasium Hidroksida (KOH) dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3) pada campuran mortar geopolimer (Priastwi *et al.*, 2021) diperoleh hasil kuat tekan mortar geopolimer tertinggi saat umur 28 hari pada mortar geopolimer yang menggunakan aktivator Sodium Silikat (Na_2SiO_3) yaitu sebesar 14,15 MPa dibandingkan aktivator Potasium Hidroksida (KOH) yang menghasilkan kuat tekan 10,14 MPa.

Penelitian (Adi *et al.*, 2018) mengungkapkan bahwa pada umur 28 hari, beton geopolimer dengan konsentrasi NaOH 8 Molar sebagai aktivator memiliki kuat tekan 75% lebih besar dibandingkan dengan beton konvensional. Pengaruh dari komposisi alkali aktivator yang digunakan untuk pembuatan mortar geopolimer juga telah dilakukan pada penelitian sebelumnya (Erlando *et al.*, 2019), dimana penggunaan aktivator sodium silikat (Na_2SiO_3) dan NaOH dengan rasio sebesar 2.5 menghasilkan kesimpulan bahwa semakin tinggi konsentrasi NaOH yang digunakan, maka semakin lama *initial setting time* yang dihasilkan. Penelitian ini bertujuan membandingkan pengaruh perendaman air laut pada mortar geopolimer dengan dan tanpa substitusi tanah putih khususnya dengan aktivator NaOH dengan mortar PPC dalam hal sifat mekanisnya. Pengaruh perendaman air laut terhadap mikrostruktur mortar juga diamati pada mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih.

Metode

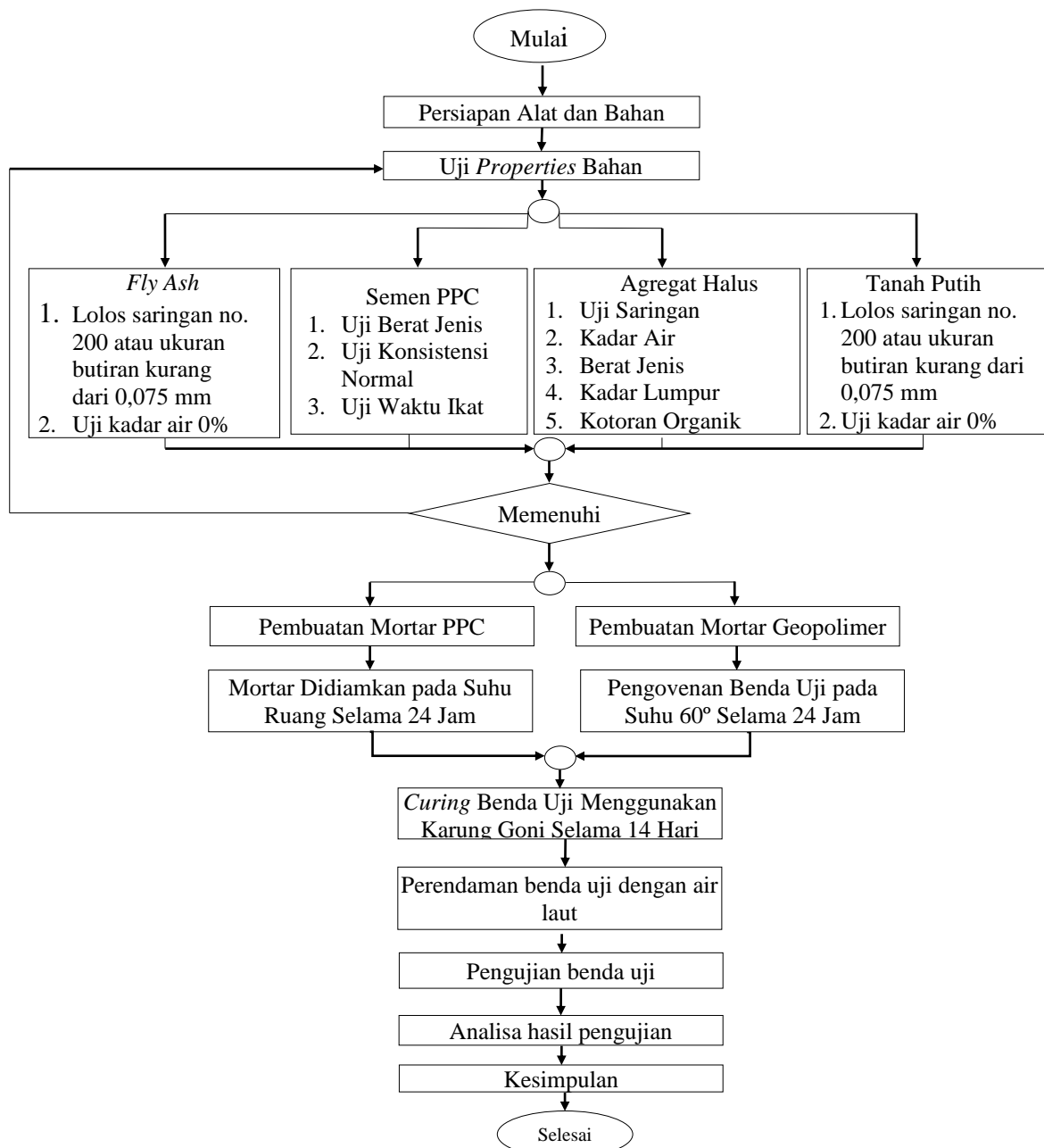
Penelitian ini dilakukan menggunakan metode eksperimental di Laboratorium dengan membuat benda uji mortar yang hasilnya kemudian dianalisis. Langkah yang dilakukan dalam penelitian seperti ditampilkan pada Gambar 1.

Material

Pada penelitian ini akan dibuat 3 variasi mortar yaitu mortar semen portland pozzolan (PPC), mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih 15% (TP 15%) dan mortar geopolimer tanpa substitusi tanah putih (TTP). Natrium Hidroksida

8M (NaOH) digunakan sebagai alkali aktivator. Pada pembuatan mortar geopolimer terdapat dua material utama yaitu tanah putih yang merupakan batuan alam dan *fly ash* yang merupakan hasil dari proses pembakaran batu bara yang berasal dari PLTU Tanjung Jati B, Jepara.

Fly ash bersifat pozzolan yang mengandung material seperti SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 . Tanah Putih merupakan batuan dengan komposisi kimia yang telah mengalami perubahan akibat pelapukan dan pengaruh kondisi air bawah tanah. Bahan penyusun tanah putih terdiri dari SiO_2 , P_2O_5 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , TiO_2 , SO_3 (Parlindungan *et al.*, 2018).



Gambar 1. Bagan alir penelitian

Pada kondisi asli kedua material tersebut masih berupa bongkahan besar sehingga dikondisikan kering dan halus dengan cara dioven, dihaluskan, dan lolos saringan nomor 0,0075 mm atau saringan nomor 200 supaya kondisi material benar-benar dalam keadaan kering dan halus pada saat pencampuran.

Komposisi

Proporsi campuran untuk mortar PPC adalah 1 PPC: 3 Ps dengan Faktor Air Semen (FAS) = 0,5, Ps merupakan agregat halus berupa pasir, sedangkan untuk mortar geopolimer menggunakan proporsi campuran 1 Pca : 3 Ps dengan Faktor Air Binder (FAB) sebesar 0,5. Pca merupakan campuran antara 85% fly ash dan 15% tanah putih untuk mortar TP 15% dan 100% fly ash untuk mortar TTP. Benda uji yang dibuat untuk tiga variasi berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm dan berbentuk *dogbone* untuk pengujian kuat tarik mortar.

Senyawa NaOH 8M yang digunakan dalam penelitian ini memiliki nilai $M_r = 40$, yang didapatkan dengan menjumlah nilai massa atom relatif setiap unsur. Kebutuhan air yang diperlukan untuk membuat setiap variasi adalah 1050 ml, sehingga kebutuhan material NaOH dapat dihitung menggunakan Persamaan 1.

$$M = \frac{\text{Massa NaOH}}{M_r} \times \frac{1000}{V_{\text{air}}} \quad (1)$$

Dari Persamaan 1 didapatkan kebutuhan massa material NaOH adalah 336 gram. Pada Tabel 1 menunjukkan komposisi campuran untuk ketiga variasi mortar.

Tabel 1. Komposisi penyusun mortar

Material	Proporsi campuran (gram)		
	PPC	TTP	TP 15%
Fly Ash	-	2100	1785
Tanah Putih	-	-	315
PPC	2100	-	-
Pasir	6300	6300	6300
NaOH	-	336	336
Air	1050	1050	1050

Pengujian mortar

Metode pengujian yang dilakukan berdasarkan standar pengujian SNI dan ASTM. Pengujian yang dilakukan adalah kuat tekan, kuat tarik langsung, densitas, porositas, absorpsi. Pengujian mikrostruktur untuk melihat pengaruh rendaman pada mortar hanya dilakukan pada mortar geopolimer substitusi tanah putih 15% (TP 15%) pada umur tujuh tanpa rendaman dan 28 hari rendaman air laut.

Kuat tekan

Kuat tekan mortar merupakan besar beban per satuan luas yang menyebabkan benda uji hancur jika dibebani dengan suatu gaya yang dihasilkan oleh mesin pembebanan (Wariyatno *et al.*, 2013). Uji kuat tekan dilakukan pada benda uji kubus berukuran 5x5x5 cm pada umur tujuh hari (tanpa rendaman), 14, 28, dan 56 hari rendaman air laut. Pengujian dilakukan menggunakan alat *Compression Test Machine (Hung Ta HT-8391 PC Computer – Controlled Servo Hydraulic)*. Dua hari sebelum pengujian, benda uji dikeluarkan dari rendaman untuk memastikan mortar dalam keadaan kering pada saat pengujian. Persamaan (2) digunakan untuk menghitung nilai kuat tekan mortar.

$$f'_c = \frac{P}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

dimana f'_c merupakan kekuatan tekan mortar (MPa atau N/mm²), P adalah gaya tekan maksimum (N), dan A merupakan luas bidang tekan (mm²).

Pengujian kuat tekan pada mortar dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengujian kuat tekan

Kuat tarik langsung

Kuat tarik adalah ukuran kuat mortar yang disebabkan oleh gaya yang memisahkan sebagian mortar akibat tarikan. Pengujian ini dilakukan pada benda uji berbentuk *dogbone* pada umur 28 hari rendaman air laut. Dua hari sebelum pengujian, benda uji dikeluarkan dari rendaman agar pada saat pengujian benda uji dalam keadaan kering. Pengujian kuat tarik seperti yang terlihat pada Gambar 3. Untuk menghitung nilai kuat tarik mortar digunakan Persamaan 3.

$$f_{ct} = \frac{P_t}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3)$$

dimana f_{ct} merupakan kekuatan tarik mortar (MPa atau N/mm²), P_t adalah gaya tarik maksimum (N), dan A adalah luas bidang tarik (mm²)



Gambar 3. Pengujian kuat tarik

Densitas

Uji densitas atau biasa disebut dengan massa jenis merupakan perbandingan antara massa dan volume suatu zat. Pengujian dilakukan pada benda uji kubus berukuran 5x5x5 cm pada umur tujuh hari (tanpa rendaman), 14, 28, dan 56 hari rendaman dengan menimbang massa mortar sebelum dan setelah perendaman air laut. Untuk mendapatkan nilai densitas dapat dihitung menggunakan Persamaan 4 dari SNI 1973:2016.

$$T = \frac{M}{V} \quad (4)$$

dimana T adalah densitas (kg/m^3), M merupakan massa benda uji (kg), dan V adalah volume benda uji (m^3).

Porositas

Porositas merupakan perbandingan volume pori-pori yang ditempati oleh fluida terhadap volume benda uji yang dinyatakan dalam satuan persen (%). Pengujian porositas dilakukan pada benda uji kubus berukuran 5x5x5 cm. Setelah dikeluarkan dari rendaman selama 28 hari, dilakukan pengovenan pada mortar dengan suhu 60°C selama ± 3 jam hingga mortar tidak mengalami perubahan massa. Mortar kemudian ditimbang pada kondisi kering, terendam air, dan SSD atau kering permukaan. Nilai porositas mortar didapatkan dari Persamaan 5 ASTM C 642-06.

$$\text{Porositas} = \frac{C-A}{C-B} \times 100\% \quad (5)$$

dimana A adalah berat sampel kering oven (gram), B merupakan berat sampel dalam air (gram), dan C adalah berat sampel kondisi SSD (gram).

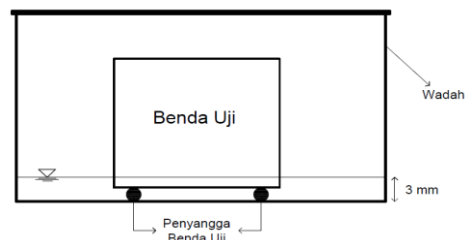
Absorpsi

Pengujian absorpsi dilakukan untuk mengetahui banyaknya air yang terserap oleh benda uji tanpa memberikan tekanan air pada benda uji tersebut. Prosedur pengujian dilakukan berdasarkan ASTM C 1403-05. Pengujian dilakukan pada benda uji kubus berukuran 5x5x5 cm yang telah direndam air

laut selama 28 hari, benda uji kemudian dikeluarkan dan didiamkan pada suhu ruang selama dua hari, setelah itu dioven dengan suhu 110°C selama 24 jam dan didiamkan pada suhu ruang selama 24 jam. Pengujian absorpsi dilakukan dengan memasukkan benda uji ke dalam wadah berisi air, kemudian benda uji ditimbang pada waktu 15 menit, 1, 4, dan 24 jam selama benda uji direndam. Nilai absorpsi dihitung pada setiap waktunya menggunakan Persamaan 6 dan *setup* pengujian terlihat pada Gambar 4.

$$A_T = \frac{(W_T - W_0) \times 10000}{(L_1 \times L_2)} \quad (6)$$

dimana W_T merupakan berat benda uji pada waktu pengamatan (gram), W_0 adalah berat awal benda uji (gram), L_1 adalah panjang rata-rata permukaan benda uji (mm), L_2 merupakan lebar rata-rata permukaan benda uji (mm).



Gambar 4. Setup pengujian absorpsi

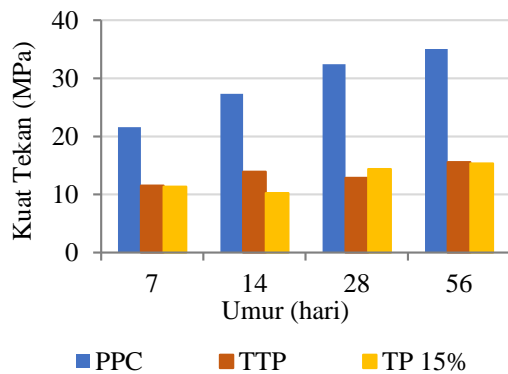
Hasil dan pembahasan

Secara visual mortar PPC memiliki warna abu-abu terang serta permukaan yang kasar sedangkan untuk mortar geopolimer memiliki permukaan yang lebih halus dan berwarna coklat terang, hal ini dikarenakan adanya campuran *fly ash* pada mortar tersebut. Ketiga variasi juga memiliki pola keruntuhan yang berbeda, dimana variasi mortar geopolimer memiliki banyak bagian yang runtuh pada saat pengujian kuat tekan dibandingkan mortar PPC.

Uji kuat tekan

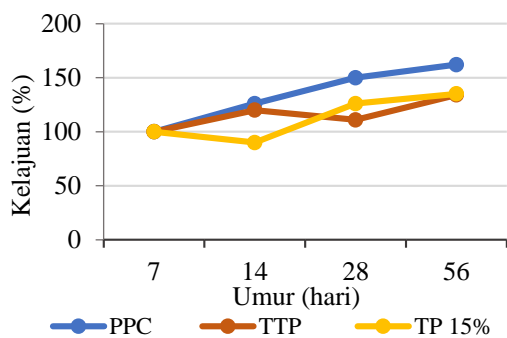
Pengujian kuat tekan dilakukan ketika mortar berumur 7 hari tanpa rendaman air laut, 14, 28, dan 56 hari perendaman air laut dengan jumlah benda uji sebanyak 3 sampel pada setiap pengujiannya. Hasil pengujian kuat tekan yang ditampilkan dalam Gambar 5 yang merupakan nilai rata-rata kekuatan tekan. Pada Gambar 5 ditunjukkan bahwa ketiga variasi mortar yang direndam dengan air laut menghasilkan kuat tekan lebih besar dibandingkan variasi mortar yang tidak direndam dengan air laut (umur 7 hari). Pada mortar PPC yang tidak direndam dengan air laut memiliki kuat tekan sebesar 21,61 MPa, sedangkan yang direndam air

laut selama 56 hari memiliki kuat tekan sebesar 35,054 MPa atau meningkat 162%. Kemudian untuk mortar TP 15% dan TTP yang tidak direndam dengan air laut memiliki kuat tekan sebesar 11,346 MPa dan 11,549 MPa, sedang yang direndam air laut selama 56 hari memiliki kuat tekan sebesar 15,339 MPa (meningkat 135%) dan 15,558 MPa (meningkat 135%). Mortar PPC konsisten mengalami peningkatan kuat tekan mulai awal direndam hingga umur pengujian 56 hari, sedangkan pada mortar geopolimer terjadi fluktuasi pada kuat tekannya. Mortar variasi PPC menghasilkan kuat tekan tertinggi pada setiap umur rendaman karena jenis semen yang digunakan merupakan semen yang memiliki ketahanan tinggi terhadap garam dan asam sulfat (Hargono *et al.*, 2002).



Gambar 5. Hasil pengujian kuat tekan

Laju perkembangan kuat tekan mortar diperoleh dari persentase tingkat perubahan mortar sebelum perendaman (tujuh hari) dengan mortar setelah perendaman air laut pada waktu umur tertentu (14, 28, dan 56 hari). Hasil kuat tekan mortar yang diperoleh pada ketiga variasi umur perendaman dibagi dengan kuat tekan mortar jenis yang sama tanpa perendaman air laut yang dianggap sebagai nilai kelajuan 100% kekuatan. Maka dapat digambarkan peningkatan maupun penurunan nilai kuat tekan dibandingkan sebelum perendaman. Grafik laju perkembangan kuat tekan ditunjukkan oleh Gambar 6.



Gambar 6. Laju perkembangan kuat tekan

Berdasarkan Gambar 6 diperoleh hasil bahwa air laut yang digunakan untuk perendaman mortar berdampak pada kelajuan kuat tekan mortar disemua variasi, khususnya pada mortar PPC yang terus mengalami peningkatan, sedangkan kelajuan kuat tekan mortar pada variasi TP dan TTP mengalami fluktuasi. Hal tersebut juga terjadi pada penelitian Qomaruddin *et al.* 2019 dimana variasi mortar PPC yang direndam air laut memiliki nilai kuat tertinggi dibandingkan mortar geopolimer dengan kondisi yang sama dengan nilai kuat tekan rata-rata sebesar 16,97 MPa sedangkan untuk rata-rata kuat tekan mortar geopolimer yaitu 13,51 MPa.

Uji kuat tarik langsung

Nilai kuat tarik diperoleh dari perhitungan besar gaya tarik maksimum (N) dibagi dengan luas penampang (mm^2). Luasan efektif mortar yang digunakan untuk uji tarik adalah luasan persegi yaitu $26,5 \text{ mm} \times 26,1 \text{ mm} = 691,65 \text{ mm}^2$ (Latief, 2010). Benda uji mortar yang dipakai pada pengujian kuat tarik langsung berbentuk *dogbone* atau menyerupai angka delapan dengan umur perendaman air laut 28 hari.

Hasil pengujian kuat tarik langsung pada semua variasi mortar ditunjukkan oleh Tabel 2 yang menunjukkan bahwa mortar *dogbone* PPC memiliki rata-rata kuat tarik tertinggi sebesar 2,318 MPa atau $23,638 \text{ kg/cm}^2$ dibandingkan dengan mortar *dogbone* TP 15% dan TTP yang memiliki kuat tarik rata-rata 0,574 MPa dan 0,993 MPa.

Tabel 2. Nilai kuat tarik langsung

Variasi mortar	Kuat tarik
	(MPa)
PPC	2,318
TTP	0,993
TP 15%	0,574

Sebagai perbandingan pada penelitian sebelumnya mortar geopolimer substitusi tanah putih (0% - 25%) dan semen PPC yang telah direndam pada air laut, dengan kuat tarik variasi PPC mencapai 2,8 MPa dibanding dengan variasi geopolimer tanah putih mencapai 0,4 MPa sampai 1,5 MPa (Priastiwi, *et al.*, 2021). Berbeda dengan rendaman larutan asam sulfat konsentrasi 10% variasi PPC tidak dapat bertahan terhadap serangan asam yang tinggi sehingga benda uji hancur dan keropos setelah perendaman namun variasi geopolimer tanah putih dapat bertahan dengan nilai kuat tarik mencapai 0,4 MPa sampai 1,1 MPa (Priastiwi, *et al.*, 2021).

Berdasarkan hasil uji kuat tarik langsung yang telah dilakukan diperoleh nilai kuat tarik lebih rendah dibandingkan dengan penelitian sebelumnya. Hal

ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu kondisi fisik dari mortar yang bentuknya kurang rapi saat dibongkar dari cetakan sehingga penempatan mortar pada alat pengujian kurang presisi. Untuk mengetahui hubungan yang terjadi antara nilai kuat tarik langsung mortar dengan kuat tekannya maka dilakukan perbandingan antara keduanya yang ditunjukkan oleh Tabel 3. Dari Tabel 3 diperoleh persentase kuat tarik langsung mortar PPC terhadap kuat tekannya sebesar 7,149%, sedangkan persentase kuat tarik langsung mortar geopolimer (TP 15% dan TTP) terhadap kuat tekannya masing-masing adalah sebesar 3,99% dan 7,724%.

Tabel 3. Perbandingan kuat tarik dan kuat tekan umur rendaman 28 hari

Variasi mortar	Kuat tarik (ft)	Kuat tekan (f'c)	Rasio kuat tarik terhadap kuat tekan (ft/f'c)
	(MPa)	(MPa)	(%)
PPC	2,318	32,427	7,149
TTP	0,993	12,853	7,724
TP 15%	0,574	14,373	3,990

Umumnya peningkatan kekuatan tekan juga akan diikuti dengan peningkatan kekuatan tarik pada tingkatan tertentu dan kekuatan tarik berpengaruh pada potensi retakan yang mungkin terjadi (Jaber *et al.*, 2018).

Uji porositas

Pengujian porositas dilaksanakan untuk memperoleh nilai porositas (%) dari variasi mortar PPC, TTP, dan TP 15% dengan benda uji berbentuk kubus ukuran 5 x 5 x 5 cm yang direndam pada air laut dengan umur rendaman 28 hari. Tabel 4 menunjukkan persentase rata-rata nilai uji porositas pada ketiga variasi mortar.

Tabel 4. Hasil pengujian porositas

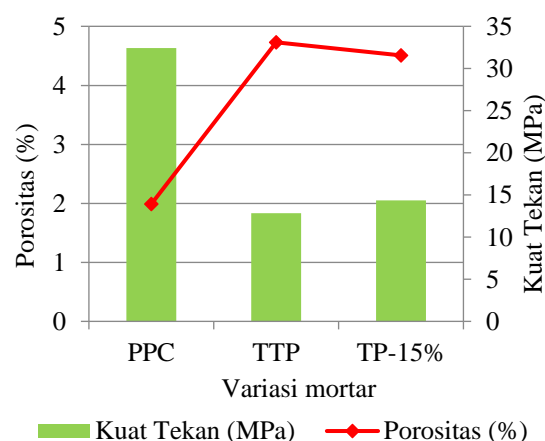
Variasi mortar	Rata-rata porositas (%)
	PPC
TP 15%	4,507
TTP	4,735

Dalam Tabel 4 ditunjukkan nilai porositas terbesar dihasilkan pada mortar variasi TTP, hal ini menunjukkan bahwa mortar TTP memiliki banyak rongga udara diantara variasi yang lain, sedangkan pada mortar PPC memiliki rongga udara paling sedikit. Faktor awal yang dapat menjadi penyebab lebih besarnya porositas mortar TTP adalah kondisi awal mortar TTP memiliki tekstur lebih lunak karena lebih basah dibandingkan mortar variasi

lainnya setelah dilepas dari cetakan. Kondisi mortar yang basah tersebut berpotensi menyebabkan terciptanya pori pada mortar setelah proses pengovenan selama 24 jam pasca pelepasan cetakan. Hal ini ditunjukkan dengan munculnya lubang-lubang kecil pada permukaan mortar yang diindikasikan sebagai pori udara. Adonan mortar TTP juga lebih cair dibandingkan adonan mortar variasi PPC maupun TP 15%.

Air yang berlebihan pada mortar geopolimer mempunyai kecenderungan berisi rongga akibat adanya gelembung-gelembung udara yang terbentuk selama dan sesudah pencetakan. Air mengawali pemakaian ruang dan akan menjadi rongga. Faktor penyebab lainnya yang mengakibatkan tingginya nilai porositas yaitu metode perendaman air laut selama 28 hari, dimana air laut bersifat korosif yang membuat timbulnya pori-pori udara pada mortar sehingga nilai porositasnya tinggi. Pada penelitian Ahmad, 2018 yang membandingkan *curing* menggunakan air laut dan air tawar menunjukkan beton yang dilakukan proses *curing* menggunakan air laut memiliki nilai porositas yaitu 16,44%, nilai tersebut lebih rendah jika dibandingkan beton yang dilakukan *curing* dengan air tawar sebesar 17,97%.

Hasil pengujian porositas disandingkan dengan hasil pengujian kuat tekan pada umur rendaman 28 hari untuk diperoleh hubungan antara keduanya. Gambar 7 menunjukkan grafik hubungan porositas dan kuat tekan dari ketiga variasi mortar. Berdasarkan Gambar 7 diperoleh hubungan yang sesuai antara mortar PPC dan mortar geopolimer, bahwa semakin rendah nilai porositas maka nilai kuat tekannya semakin tinggi.



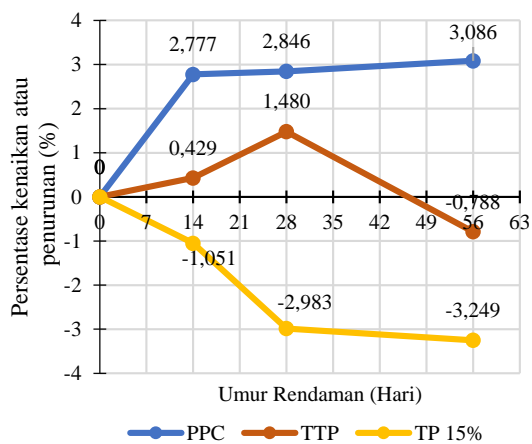
Gambar 7. Perbandingan porositas dan kuat tekan mortar umur rendaman 28 hari

Hubungan yang terjadi antara kuat tekan dan porositas adalah berbanding terbalik (Priastiwi, *et al.*, 2020), nilai porositas yang berbanding terbalik

dengan nilai kuat tekan juga terjadi pada penelitian Wardhono & Simanjuntak, 2022. Nilai porositas yang lebih rendah menunjukkan persentase pori yang kecil sehingga membuat tingkat penyerapan air ke dalam mortar menjadi lebih kecil dan nilai kuat tekannya meningkat.

Uji densitas

Nilai kerapatan atau densitas didapatkan dari perhitungan massa jenis yang menggunakan data massa dan volume benda uji kubus. Massa jenis sebelum dan setelah dilakukan perendaman kemudian dibandingkan untuk mendapatkan nilai perubahan massa jenis mortar. Grafik perubahan massa jenis mortar dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Grafik perubahan massa jenis mortar

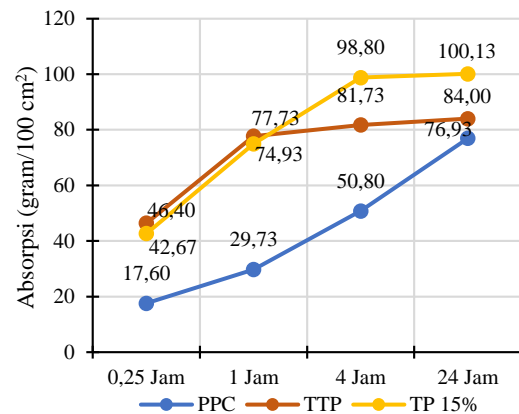
Mortar PPC terus mengalami peningkatan nilai massa jenis seiring bertambah umur rendaman. Nilai densitas tertinggi terjadi pada umur rendaman 56 hari sebesar 3,086% dimana massa jenis sebelum rendaman adalah 2,069 gr/cm³ dan setelah rendaman yaitu 2,133 gr/cm³, sedangkan pada mortar geopolimer TP 15% dan TTP mengalami penurunan massa jenis hingga umur 56 hari rendaman. Mortar TP 15% terus mengalami penurunan mulai awal rendaman dengan penurunan tertinggi terjadi pada umur 56 hari rendaman sebesar 3,249% sedangkan pada mortar TTP mengalami peningkatan massa jenis hingga umur 28 hari rendaman sebesar 1,480% namun kemudian mengalami penurunan massa jenis sebesar 0,788%.

Kondisi yang ditunjukkan membuktikan bahwa perendaman dengan air laut bersifat korosif terhadap kerapatan mortar geopolimer, sedangkan pada mortar PPC peredaman hingga 56 hari dengan air laut belum berpengaruh terhadap kerapatan mortar karena pada semen terjadi proses hidrasi semen yang merupakan reaksi antara air dan bahan

penyusun semen yang menimbulkan panas dan berfungsi untuk mempercepat proses pengerasan

Uji absorpsi

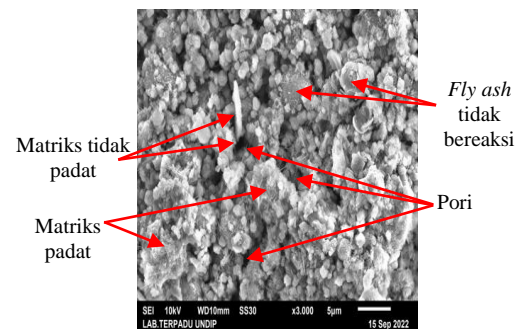
Laju resapan benda uji mortar terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 9. Dari Gambar 9 didapatkan mortar TP 15% memiliki tingkat keawetan yang rendah karena memiliki nilai absorpsi yang tinggi, beton dengan nilai absorpsi yang tinggi dapat menyerap unsur-unsur pada air yang dapat menyebabkan keawetan beton menurun seperti klorida atau sulfat. Mortar TP 15% memiliki nilai porositas yang lebih rendah dibandingkan mortar TTP walaupun memiliki nilai absorpsi yang lebih tinggi dikarenakan pada tanah putih terdapat unsur CaO atau kapur tohor, apabila unsur tersebut bereaksi akan menimbulkan panas yang menyebabkan tanah putih menyerap lebih air (Mulyono, 2018).



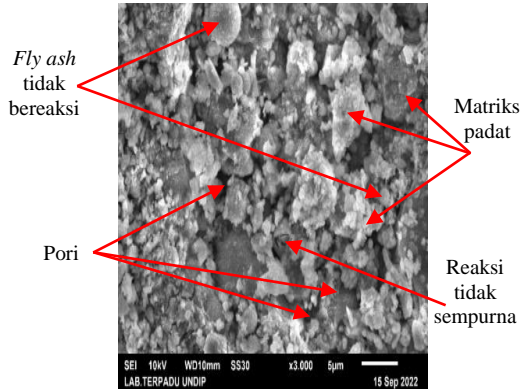
Gambar 9. Nilai absorpsi rata-rata

Uji mikrostruktur

Pengaruh rendaman air laut pada mikrostruktur mortar ditunjukkan pada hasil pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) mortar TP 15% sebelum dan sesudah adanya perendaman seperti ditunjukkan pada Gambar 10 dan 11.



Gambar 10. SEM mortar TP 15% tanpa rendaman air laut

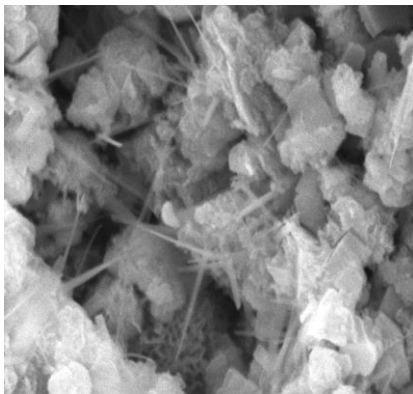


Gambar 11. SEM mortar TP 15% dengan rendaman air laut

Bentuk morfologi mortar geopolimer TP 15% umur tujuh hari tanpa rendaman memiliki matriks yang padat dan ikatan antar partikel yang terbentuk solid walaupun terdapat pori-pori dan matriks yang tidak padat di beberapa bagian mortar. Pada mortar juga ditemukan *fly ash* yang tidak bereaksi.

Bentuk morfologi mortar TP 15% 28 hari rendaman air laut yang pada Gambar 11 menunjukkan pada mortar terdapat lebih banyak matriks yang padat dibandingkan mortar tanpa rendaman. Pada mortar juga ditemukan hasil reaksi yang tidak sempurna, ikatan antar partikel yang lebih solid ditandai dengan lebih sedikit pori-pori yang terdapat pada mortar, hal ini dibuktikan juga dengan hasil kuat tekan mortar yang meningkat pada umur 28 hari rendaman.

Pada mortar umur 7 hari tanpa rendaman air laut ditemukan *ettringite* berbentuk seperti serabut yang ditunjukkan Gambar 12 yang terbentuk akibat reaksi hidrasi SiO_2 dan Al_2O_3 *fly ash* dengan CH yang disebabkan oleh sifat pozolanik *fly ash*. *Ettringite* pada mortar dapat menyebabkan *crack* pada mortar, sedangkan untuk sampel 28 hari tidak ditemukan *ettringite*, karena adanya pengaruh aktivator NaOH seperti pada penelitian (Khan & Kayali, 2013).



Gambar 12. Ettringite

Bentuk fisik mortar

Kondisi permukaan mortar PPC memiliki permukaan yang lebih kasar dan tidak rata dikarenakan campuran PPC lebih menyerap banyak air, sedangkan mortar geopolimer memiliki permukaan yang lebih rata dan halus karena pada saat pencampuran, campuran mortar geopolimer lebih encer dibandingkan campuran mortar PPC. Mortar PPC memiliki warna abu-abu terang sedangkan mortar geopolimer memiliki warna coklat terang akibat penggunaan *fly ash* yang berwarna coklat.



Gambar 13. Kondisi permukaan mortar

Perubahan fisik pada mortar terjadi pada saat dilakukan *curing* selama 14 hari pada suhu ruangan dengan munculnya lapisan putih pada permukaan mortar geopolimer. Hal ini disebabkan oleh unsur Al dan Si berlebih yang keluar melalui pori-pori dan retakan yang kemudian bereaksi dengan CO_2 membentuk zat putih seperti kristal karbonat (*Efflorescence*) seperti pada penelitian (Tan *et al.*, 2022) dan (Wu *et al.*, 2022).



Gambar 14. Efflorescence pada mortar geopolimer

Dari Gambar 14 diperoleh *efflorescence* lebih banyak muncul pada mortar TP 15%, hal ini diakibatkan karena mortar tersebut memiliki lebih banyak kandungan Al dan Si. Banyaknya *efflorescence* yang muncul juga dapat dipengaruhi oleh aktivator yang digunakan, suhu pada saat *curing*, dan penambahan materi berupa *fly ash* atau tanah putih.

Kesimpulan

Pengujian sifat mekanis yang dilakukan pada mortar PPC dan mortar geopolimer menunjukkan ketahanan mortar PPC lebih baik dibandingkan dengan mortar geopolimer. Sifat mekanis berupa

kuat tekan, kuat tarik, porositas, dan absorpsi jika dibandingkan dengan mortar geopolimer baik TTP ataupun TP 15% dengan rendaman air laut. Untuk pengujian densitas, mortar geopolimer TTP dan TP 15% memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan mortar PPC. Pada mortar geopolimer, mortar TTP memiliki ketahanan yang hampir sama dengan mortar TP 15% setelah perendaman air laut, dimana hasil kuat tekan tertinggi adalah 15,558 MPa pada umur 56 hari rendaman air laut, pada kondisi yang sama mortar TP 15% memiliki hasil kuat tekan sebesar 15,339 MPa. Pada pengujian kuat tarik langsung dan absorpsi, mortar TTP memiliki hasil yang lebih baik, sedangkan mortar TP 15% memiliki hasil yang lebih baik pada pengujian densitas dan porositas.

Hasil uji SEM mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih 15% umur 7 hari (tanpa rendaman air laut) terdapat *Ettringite* dan banyak matriks yang tidak padat, sedangkan pada umur rendaman 28 hari tidak terdapat *Ettringite* dan banyak matriks yang padat. Perendaman dengan air laut juga mengakibatkan munculnya unsur Klorida (Cl) pada hasil uji SEM EDX.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat UNDIP yang telah membantu keberlangsungan penelitian ini.

Daftar Pustaka

Adi S, D., F. Rahman N, H.A. Lie, and Purwanto. (2018). Studi Experimental Pengaruh Perbedaan Molaritas Aktivator Pada Perilaku Beton Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash*. *Jurnal Karya Teknik Sipil* 7, 89–98.

Ahmad, S. B. (2018). Investigasi Pengaruh Air Laut Sebagai Air Pencampuran Dan Perawatan Terhadap Sifat Beton. *INTEK: Jurnal Penelitian*, 5(1), 48.

ASTM C642-06 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *ASTM Int.* 1997;(March), 1–3.

ASTM C 1403-05. “Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars” *United States: ASTM International*.

Davidovits, Joseph. (1994). Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries.” *World Resource Review*, 6(2), 263–78.

Edowinsyah and Firdaus. (2021). Lightweight Mortar Geopolimer Based on *Fly Ash* and Palm Ash. *Jurnal Tekno*, 18(2): 21–29.

Erlando, Wempy, Goey Frengki, and Djwantoro Hardjito. (2019). Pengaruh Urutan Pencampuran Dan Komposisi Alkali Aktivator Terhadap Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* Tipe C. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 1, 350–57.

Hargono, M. Jaeni, dan F. S. Budi. (2002). Pengaruh Perbandingan Semen Pozolan Dan Semen Portland Terhadap Kekekalan Bentuk Dan Kuat Tekan Semen.” *Momentum*, 21–25

Jaber, A., Gorgis, I., and Hassan, M., (2018). Relationship Splitting Tensile and Compressive Strength for Self-Compacting Concrete Containing Nano-and Micro Silica. *Matec web of Conference* 162,02013. Pp 1-8.

Kaya, M., Uysal, M., Yilmaz, K., Karahan, O., & Atis, C. D. (2020). Mechanical properties of class C and F *fly ash* geopolymer mortars. *Gradjevinar*, 72(4), 297–309.

Khan, M. S. H., & Kayali, O. (2013). Effect of NaOH activation on ettringite in concrete containing ground granulated blast furnace slag. *Sustainable Construction Materials and Technologies*, 2013-August, 1–11.

Li, H., Gao, P., Xu, F., Sun, T., Zhou, Y., Zhu, J., Peng, C., & Lin, J. (2021). Effect of fine aggregate particle characteristics on mechanical properties of *fly ash*-based geopolymer mortar. *Minerals*, 11(8)

Lloyd, N A, and Vijaya Rangan. (2010). Geopolymer Concrete with *Fly Ash*. ResearchGate, Coventry University and University of Wisconsin Milwaukee Centre for By-products Utilization, Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Ancona Italy.

Latief, A. (2010). Kuat Tarik Langsung, Kuat Tarik Lentur, Susut dan Density Mortar Campuran Semen, Abu Sekam Padi, dan Precious Slag Ball dengan Persentase 30%; 40%, *Skripsi*, Depok: Universitas Indonesia.

Mehta, P. K. (2004). High-Performance, High-Volume *Fly Ash* Concrete for Sustainable Development. *International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*: 3–14.

- Mulyono T. (2018). *Teknologi Beton: Dari TeorKe Praktek*. Andi offset, Yogyakarta:1-26.
- Parluhutan, S, Fernando, G, Purwanto, and Priastiw, Y.A (2018). Studi Kelayakan Pemanfaatan Campuran fly ash dan Tanah Putih sebagai Semen Alternatif. *Jurnal Karya Teknik Sipil V*, 7(2).
- Priastiw, Y. A., Hidayat, A, Daryanto, D., and ZSalamsyah, Z.. (2020). Pengaruh Substitusi Tanah Putih Pada Mortar Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* Dengan Aktifator Natrium Hidroksida. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 26(1), 9–16.
- Priastiw, Y.A., Hidayat, A., Prabawa, R.A., and Leksono, L., (2021). White Soil in Mortar Geopolymer with Potassium Hydroxide as the Activator.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 700(1).
- Priastiw, Y.A, Muhrozi, and Daryanto, D., (2020). Setting Time of the Geopolymer Binder with White Soil Substitution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 771(1).
- Putri, N. D., Olivia, M., & Djauhari, Z. (2015). Kuat tekan, porositas dan sorptivity mortar dengan bahan tambah gula aren pada suhu tinggi. *Prosiding 2nd Andalas Civil Engineering National Conference*, 2011, 153–159.
- Qomaruddin, Mochammad, Abda Rizka Nabella, Irene Sitohang, and Han Ay Lie. (2019). Studi Pengaruh Air Laut Pada Mortar Beton Normal Dan Mortar Beton Dengan *Fly Ash*. *Jurnal Teknik Sipil* 14(3),153–60.
- Samadhi, Tjokorde Walmiki, and Pambudi Pajar Pratama. (2013). Pembuatan Geopolimer Dari Metakaolin dan Abu Terbang. *11(5)*, 265–74.
- SNI 15-0302-2004 (2004) Semen Portland Pozolan. *Badan Standardisasi Nasional (BSN)* 9.
- SNI 1973:2016. (2016). Metode Uji Densitas, Volume Produksi Campuran dan Kadar Udara Beton.” *Badan Standardisasi Nasional (BSN)*.
- Tan, Jiawei, Özlem Cizer, Brecht Vandevyvere, Jentel De Vlieger, Hancheng Dan, dan Jiabin Li. (2022). Efflorescence mitigation in construction and demolition waste (CDW) based geopolymer. *Journal of Building Engineering* 58(February).
- Wahyuni, Subaer, and Nurhayati. (2020). Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Terhadap Struktur Dan Sifat Mekanik Geopolimer Berbasis *Fly Ash*. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 16(2), 171.
- Wardhono, A., & Simanjuntak, D. M. (2022). Analisis Kuat Tekan dan Porositas Mortar Geopolimer Menggunakan Abu Sekam Padi Sebagai Bahan Substitusi *Fly Ash* Pada Molaritas 8. Universitas Negeri Surabaya, 1–10.
- Wariyatno, Nanang Gunawan, dan Yanuar Haryanto. (2013). Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Sebagai Nilai Estimasi Kekuatan Sisa pada Beton Serat Kasa Aluminium Akibat Variasi Suhu. *Dinamika Rekayasa*, 9(1), 21–28.
- Wedhanto, S. (2017). Pengaruh Air Laut Terhadap Kekuatan Tekan Beton yang Terbuat dari Berbagai Merk Semen yang Ada di Kota Malang. *Jurnal Bangunan*, 22(2), 21–30.
- Wu, Bo, Liangfeng Li, Hao Deng, Zhao Zheng, Yi Xiang, Yuxiang Li, dan Xue Ma. (2022). Characteristics and mechanism of efflorescence in *fly ash*-based geopolymer mortars under quasi-natural condition. *Journal of Building Engineering* 55(May).