

Daya Tahan Mortar Geopolimer dan Mortar Semen Portland Pozzolan (PPC) Terhadap Larutan Asam Sulfat

*Ilham Nurhuda, Yulita Arni Priastiwi, Nuroji, Variandi Ardidawa,
Chazaidhan ALFahd Nizami
Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro Semarang
*ilham@live.undip.ac.id

Received: 22 Mei 2022 Revised: 16 Januari 2023 Accepted: 18 Januari 2023

Abstract

The manufacture of cement is often criticized to produce high CO₂ emissions to the environment. Reducing cement in construction is believed to be the solution for a better environment. Portland pozzolan cement (PPC) is known as a more environmentally friendly cement that substitutes some portion of cement clinkers with pozzolanic materials such as fly ash. Another material that is considered green material is Geopolymer. The purpose of this study is to investigate the durability of mortars made of PPC and geopolymer in a corrosive environment. The geopolymer mortar was made of fly ash with 25% white soil substitution, and also 8M NaOH and Na₂SiO₃ as activators. The corrosive condition was simulated by Sulfuric Acid solution (H₂SO₄) with a pH of 4. The durability of the two types of mortar was investigated by testing their compressive strength, direct tensile strength, porosity, density, and the changes in mass and physical shapes after immersion. The results show that the immersion of the mortars in a solution of pH 4 sulfuric acid does not make any major effects on the performance of the PPC mortar. However, the performance of geopolymer mortar with 25% white soil substitution decreases after being immersed in a sulfuric acid solution.

Keywords: Mortar, geopolymer, white soil, PPC, sulfuric acid

Abstrak

Penggunaan semen dalam beton sering dikritik karena pembuatan semen menghasilkan emisi CO₂ yang tinggi ke lingkungan. Pengurangan semen dalam konstruksi atau mengganti semen dengan material lain yang lebih ramah lingkungan diyakini dapat menjadi solusi untuk lingkungan yang lebih baik. Semen portland pozzolan (PPC) dikenal sebagai semen yang lebih ramah lingkungan yang menggantikan sebagian klinker semen dengan bahan pozzolan seperti fly ash. Bahan ramah lingkungan lainnya adalah geopolimer yang sepenuhnya menggantikan semen dengan bahan pozzolan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui durabilitas mortar berbahan PPC dan geopolimer pada lingkungan korosif. Mortar geopolimer terbuat dari fly ash dengan substitusi tanah putih 25%, serta aktivator NaOH 8M dan Na₂SiO₃. Kondisi korosi disimulasikan dengan larutan Asam Sulfat (H₂SO₄) dengan pH 4. Durabilitas mortar diamati pada umur perendaman 14, 28, 56, dan 100 hari. Keawetan kedua jenis mortar diperiksa dengan menguji kuat tekan, kuat tarik langsung, porositas, densitas dan mengamati perubahan massa dan bentuk fisik setelah perendaman. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perendaman mortar dalam larutan Asam Sulfat pH 4 tidak berpengaruh besar terhadap kinerja mortar PPC. Namun, kinerja mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih 25% menurun setelah direndam dalam larutan asam sulfat.

Kata kunci: Mortar, geopolimer, tanah putih, PPC, asam sulfat

Pendahuluan

Pembangunan infrastruktur termasuk ke dalam prioritas nasional di Indonesia yang dinilai penting untuk meningkatkan produktivitas serta daya saing. Meningkatnya pembangunan perlu

didukung dengan sumber daya material yang cukup. Khususnya material konvensional penyusun beton seperti pasir, batu pecah dan semen. Sejak diadakan Konferensi Tingkat Tinggi (KTT) BUMI di Rio de Janeiro, Brazil pada tahun 1992 yang membahas mengenai ancaman

perubahan iklim dari emisi gas rumah kaca menjadi perhatian negara industri penghasil gas karbon dioksida maupun gas lainnya terhadap masa depan atmosfer bumi. Salah satu industri yang menyumbang emisi gas CO₂ cukup besar ke udara adalah industri semen. Salah satu upaya menekan produksi emisi gas rumah kaca ke atmosfer adalah dengan mengurangi bahkan mengganti penggunaan semen portland dengan sumber daya baru yang lebih ramah lingkungan serta memiliki kemampuan daya ikat baik.

Menurut *Global Wetlands* pada tahun 2019, negara dengan lahan gambut terbesar kedua di dunia adalah Indonesia yang mencapai 22,5 juta hektar. Hasil pengujian pH di lapangan pada air gambut di Kabupaten Kampar, Riau menunjukkan pH dengan rentang 4-5 yang merupakan kadar pH untuk kondisi asam. Beton yang berada pada lingkungan asam dapat menurun kinerjanya seperti penurunan nilai kuat tekan beton (Pandiangan, *et al.*, 2014). Kondisi fisik beton akan mengalami pengeroposan dan membuat kepadatan beton berkurang akibat tidak dapat bertahan terhadap konsentrasi asam sulfat dan asam klorida yang tinggi (Ikomudin, *et al.*, 2016).

Semen PPC dapat menjadi salah satu alternatif untuk mengurangi emisi gas CO₂ dikarenakan material ini menggunakan substitusi bahan semen normal (OPC) dengan material pozzolan seperti *fly ash* sebanyak 6%-40% dari berat semen. *Fly ash* umumnya berasal dari limbah pembakaran batu bara, maka penggunaan PPC yang menggunakan bahan limbah menjadikan material ini lebih ramah terhadap lingkungan. Semen PPC diketahui memiliki durabilitas yang lebih baik dibandingkan dengan semen OPC. Sifat PPC yang memiliki durabilitas yang baik menjadi keuntungan untuk digunakan di lingkungan yang korosif.

Upaya yang lebih ekstrim dalam mereduksi penggunaan semen OPC adalah dengan menggunakan semen geopolimer yang menggunakan bahan *fly ash* yang berasal dari limbah sebagai material utamanya. *Fly ash* sebagai bahan geopolimer pengganti semen telah menarik berbagai penelitian di seluruh dunia karena mampu menurunkan emisi CO₂ hingga sembilan kali lipat daripada semen portland (Davidovits, 2020). Saat ini telah banyak penelitian mengenai geopolimer yang dapat disintesis dari bahan dasar yang murah dari limbah industri seperti abu terbang (*fly ash*) (Wallah, 2014; Samadhi, *et al.*, 2016; Surja, *et al.*, 2017), abu sawit (*palm oil fuel ash*) (Islami, *et al.*, 2015; Wulandari, *et al.*, 2015; Pradana, *et al.*, 2016), abu sekam padi (*rice husk ash*) (Widyananto, *et al.*, 2017; Sandya, *et al.*, 2019; Wahyuni, *et al.*, 2020) dan terak nikel besi

(*ferro-nickel slag*) (Komnitsas, *et al.*, 2019; Chen, *et al.*, 2020; Kuri, *et al.*, 2021).

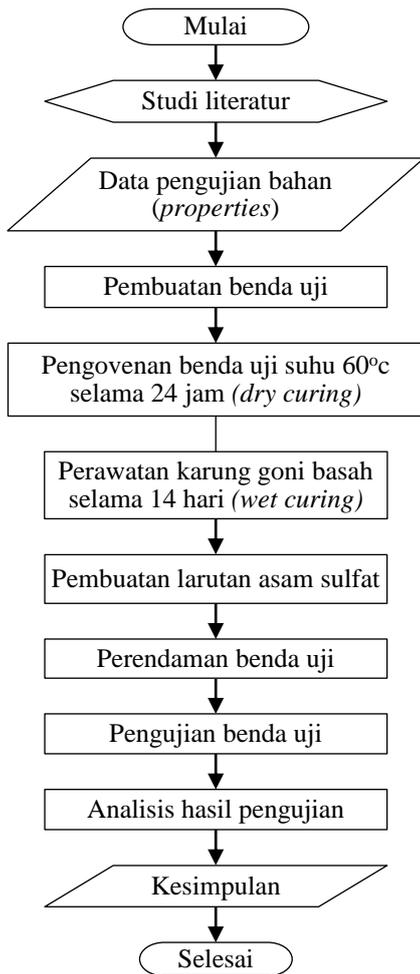
Dalam SNI 2049-2015 dikatakan bahwa mortar adalah suatu campuran yang terdiri dari semen, agregat halus dan air baik dalam keadaan dikeraskan ataupun tidak dikeraskan. Mortar digunakan sebagai perekat dalam struktur bangunan serta mortar juga berfungsi sebagai plesteran suatu permukaan struktur bangunan. Berdasarkan ASTM C307-03 (2004), ada empat tipe mortar untuk adukan pasangan berdasarkan kuat tekannya. Mortar tipe M merupakan campuran dengan kuat tekan yang tinggi minimum 17,2 MPa. Mortar tipe S merupakan campuran dengan kuat tekan sedang dengan minimum 12,4 MPa. Mortar tipe N merupakan campuran umum yang dapat menahan beban tekan kecil dengan minimum 5,2 MPa. Mortar tipe O merupakan mortar kuat tekan yang rendah dengan minimumnya mencapai 2,4 MPa.

Berdasarkan penelitian (Priastiwi, *et al.*, 2021) sebelumnya mengenai kondisi asam dengan memberikan larutan asam sulfat kadar 10%, hasil penelitian tersebut didapatkan variasi mortar substitusi tanah putih 25% lebih baik dari variasi lainnya. Hal ini ditunjukkan dengan perendaman pada asam sulfat masih memiliki kekuatan tekan senilai 15,02 MPa dan kekuatan tarik langsung 1,12 MPa dengan porositas 0,17% serta densitas 2,20 gram/cm³. Namun demikian, kondisi larutan asam sulfat dengan kadar 10% dalam penelitian tersebut kurang mewakili lingkungan kondisi asam yang seringkali dijumpai dengan pH 4-5.

Penelitian ini akan mempelajari daya tahan mortar yang dibuat dari dua material pengikat yaitu semen PPC dan geopolimer yang direndam dalam larutan asam H₂SO₄ dengan pH 4. Bahan geopolimer menggunakan *fly ash* sebanyak 75% dan substitusi tanah putih sebesar 25% dengan alkali aktivator berupa NaOH dan Na₂SiO₃. Tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan ketahanan kedua jenis mortar pada pengujian kuat tekan, kuat tarik langsung, porositas, densitas serta perubahan bentuk massa dan bentuk fisik setelah perendaman dalam larutan asam sulfat dengan pH 4 dengan variasi umur rendaman 14; 28; 56; dan 100 hari.

Metode

Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah eksperimental di laboratorium dengan membuat benda uji. Penentuan metode penting dalam penelitian dimulai dari studi literatur hingga didapatkan kesimpulan untuk hasil yang maksimal. Pada Gambar 1 ditunjukkan bagan alir (*flowchart*) penelitian ini.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Material

Pada penelitian ini akan dibuat dua jenis mortar dari komposisi material yang berbeda. Jenis mortar yang pertama menggunakan material geopolimer dengan substitusi tanah putih 25% yang kemudian disebut mortar GT-25 dan jenis kedua menggunakan material semen tipe portland pozzolan yang disebut mortar PPC. Mortar GT-25 menggunakan material utama *fly ash* yang berasal dari PLTU Tanjung Jati B Jepara dan tanah putih yang berasal dari Kupang, Nusa Tenggara Timur. *Fly ash* merupakan residu mineral berupa partikel halus yang dihasilkan dari pembakaran batu bara yang dihaluskan di pembangkit listrik.

Tanah putih adalah batuan yang komposisi kimianya telah mengalami perubahan akibat pengaruh kondisi air tanah dan proses pelapukan. Bahan galian ini berwarna putih kekuningan sampai putih kecoklatan, padat dan cukup sulit digali dengan alat sederhana (Priastiwi, *et al.*, 2020). Tanah putih memiliki komposisi kimia yaitu SiO₂, P₂O₅, Al₂O₃, Fe₂O₃, FeO, MnO, MgO,

CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, SO₃ (Hunggurami, *et al.*, 2015). Kedua material ini perlu ditumbuk dan dihaluskan sebelum disaring dengan saringan nomor 200 atau ukuran 0,075 mm serta dioven hingga kadar air 0% yang bertujuan mempermudah material ini tercampur rata. Material *fly ash* dan tanah putih sebagai pengikat (*binder*) perlu diaktivasi menggunakan larutan alkali aktivator. Aktivator diperlukan untuk reaksi polimerisasi monomer alumina dan silika. Alkali mengaktifkan prekursor dengan melarutkan prekursor dalam monomer (SiO₂) dan (AlO₃). Pada penelitian ini menggunakan campuran dari Natrium Hidroksida (NaOH) 8M dan Natrium Silikat (Na₂SiO₃).

Komposisi

Mortar geopolimer substitusi tanah putih 25% menggunakan proporsi campuran 1 Pca : 3 Ps dengan Faktor Air Binder sebesar 0,5. Pca merupakan campuran antara *fly ash* 75% dan tanah putih 25%, sedangkan Ps merupakan agregat halus (pasir). Alkali aktivator yang digunakan merupakan campuran NaOH 8M dan Na₂SiO₃ dengan perbandingan 1 : 2,5. Sedangkan mortar PPC memiliki proporsi 1 PPC : 3 Ps dengan Faktor Air Semen 0,5. Total benda uji yang dibuat sebanyak 48 buah dengan rincian 42 buah kubus 50 x 50 x 50 mm dan 6 buah *dogbone* khusus untuk uji tarik mortar. Tabel 1 menunjukkan komposisi campuran kedua variasi mortar.

Pada penelitian ini ditetapkan Molaritas untuk NaOH 8M. Dengan diketahui nilai Mr NaOH = 40 (jumlah dari Ar, Na = 23, O = 16 dan H = 1) dan volume air yang digunakan yaitu 1200 ml dapat dihitung kebutuhan material NaOH dan Na₂SiO₃. Dengan Persamaan (1) dapat digunakan untuk menghitung massa NaOH.

$$M = \frac{\text{Massa NaOH (m)}}{\text{Mr NaOH}} \times \frac{1000}{\text{Volume Air (ml)}} \quad (1)$$

Dari perhitungan Persamaan (1) didapatkan massa NaOH sebesar 384 gr. Untuk menentukan massa Na₂SiO₃ dapat dihitung menggunakan Persamaan (2) dengan ditetapkan perbandingan 2,5 terhadap NaOH pada penelitian ini.

$$2,5 = \frac{\text{Massa Na}_2\text{SiO}_3 \text{ (gr)}}{\text{Massa NaOH (gr)}} \quad (2)$$

Dari perhitungan Persamaan (2) didapatkan massa Na₂SiO₃ sebesar 960 gr.

Pengujian mortar

Metode pengujian akan dilakukan berdasarkan standar pengujian yang ditetapkan. Terdapat empat parameter pengujian yang diteliti yaitu porositas, densitas, kuat tekan, dan kuat tarik langsung.

Tabel 1. Komposisi mortar

Material	Proporsi campuran (gr)	
	Mortar GT-25	Mortar PPC
Fly ash	1800	-
Tanah Putih	600	-
Semen PPC	-	2400
Pasir	7200	7200
NaOH	384	-
Na ₂ SiO ₃	960	-
Air	1200	1200

Porositas

Uji porositas dilakukan menurut ASTM C642-06 (2006). Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui persentase besarnya pori pada mortar. Benda uji yang telah direndam selama 28 hari digunakan untuk pengujian ini. Sehari sebelum pengujian dilakukan benda uji akan dikeluarkan dari rendaman. Sebelum perhitungan massa kering mortar akan dioven dengan suhu 60°C selama ± 3 jam hingga mortar tidak mengalami perubahan massa. Perhitungan massa dalam air menggunakan Neraca O-haus dan massa SSD dilakukan setelahnya dengan mengeringkan permukaan. Persamaan (3) digunakan untuk menghitung nilai porositas mortar.

$$\text{Porositas} = \frac{B-C}{B-A} \times 100\% \quad (3)$$

dimana A merupakan massa kering mortar (gram), B merupakan Massa SSD mortar (gram), C merupakan Massa mortar di dalam air (gram)/

Densitas

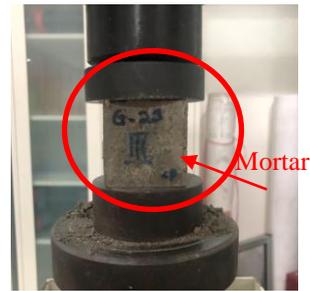
Uji densitas atau kerapatan mortar, γ (gram/cm³) dilakukan menurut SNI 1973:2016. Pengujian dilakukan untuk mengetahui ukuran antara massa mortar, m (gram) terhadap volume mortar, V (cm³). Pengujian ini dilakukan dengan cara menimbang massa mortar kemudian dibagi dengan volume mortar. Pengujian dilakukan pada benda uji yang sama sebelum dan setelah perendaman.

Kuat Tekan

Uji kuat tekan dilakukan menurut SNI 03-6852-2002. Pengujian dilakukan menggunakan alat *Universal Test Machine (Hung Ta HT-8391 PC Computer – Controlled Servo Hydraulic)* untuk mengetahui kuat tekan mortar. Pengujian dilakukan pada benda uji dengan dan tanpa rendaman. Sebelum pengujian dilakukan benda uji dikeluarkan 1 hari sebelumnya dari rendaman untuk mengeringkan mortar.

Kuat tekan mortar, $f'c$ (MPa) diperoleh dengan membagi besar beban maksimum yang diterima mortar, $P(N)$ dengan luasan mortar, A (mm²).

Gambar 2 menunjukkan pengujian kuat tekan mortar dengan *Universal Test Machine*.



Gambar 2. Pengujian kuat tekan mortar

Kuat tarik langsung

Uji kuat tarik langsung dilakukan menurut ASTM C307-03 (2004). Pengujian dilakukan untuk mengetahui kuat tarik mortar kedua variasi setelah perendaman 28 hari. Hasil pengujian ini akan dibandingkan dengan nilai kuat tekan pada perendaman yang sama untuk didapatkan persentase perbandingannya. Persamaan (4) digunakan untuk menghitung nilai kuat tarik langsung mortar dan Gambar 3 menunjukkan pengujian kuat tarik langsung mortar.



Gambar 3. Uji kuat tarik mortar

$$f_{ct} = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Dimana f_{ct} merupakan kuat tarik mortar (N/mm² atau MPa), P merupakan Gaya tarik maksimum (N) dan A merupakan Luas bidang tarik terkecil (mm²)

Hasil dan Pembahasan

Seluruh spesimen yang disiapkan untuk data benda uji tanpa perendaman dan setelah perendaman akan dihitung dan dianalisis. Pembahasan mengenai data yang didapatkan dari pengujian ditampilkan dalam bentuk tabel maupun grafik.

Pengujian porositas

Pada pengujian porositas ini menggunakan benda uji berbentuk kubus berukuran 50x50x50 mm

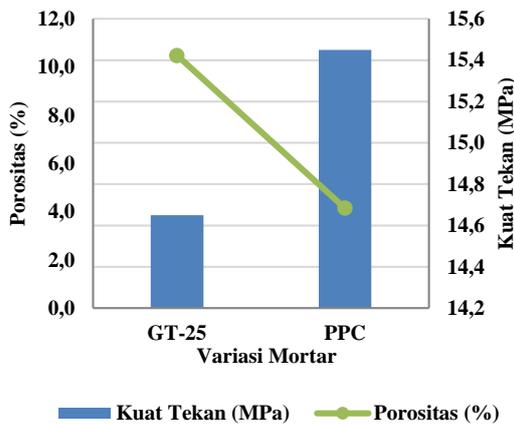
umur rendaman 28 hari larutan asam sulfat pH 4. Pada Tabel 2 ditunjukkan persentase rata-rata nilai porositas kedua variasi mortar.

Tabel 2. Persentase porositas mortar

Variasi Mortar	Porositas (%)	Selisih porositas (%)
GT-25	10,48	6,34
M-PPC	4,15	

Berdasarkan Tabel 2 tentang hasil persentase porositas yang didapatkan, mortar GT-25 memiliki rongga udara yang lebih besar dibanding mortar PPC setelah perendaman 28 hari dalam larutan asam sulfat pH 4. Selisih pori terbentuk antara kedua variasi cukup signifikan mencapai 6,34%. Faktor besarnya nilai porositas mortar GT-25 didorong oleh adanya retak permukaan sisi atas sejak setelah pengovenan suhu 60°C selama 24 jam pasca pembongkaran. Hal ini menyebabkan rendaman asam sulfat lebih banyak masuk dan tertahan di dalam mortar pada pori yang lebih besar. Kadar asam yang berlebihan di dalam mortar mampu memperbesar pori udara pada benda uji.

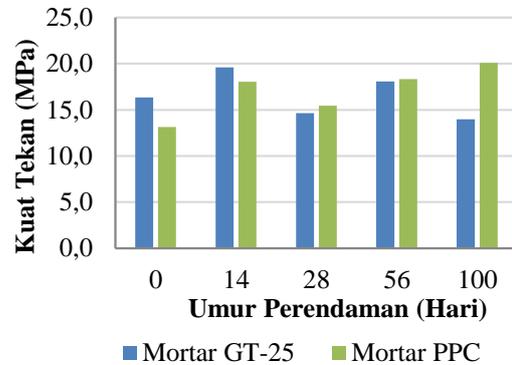
Sebagai perbandingan persentase porositas terhadap kuat tekan, dapat dibandingkan hasil kedua pengujian pada seluruh benda uji umur rendaman yang sama yaitu 28 hari untuk melihat korelasinya. Pada Gambar 4 ditunjukkan grafik perbandingan porositas dan kuat tekan kedua jenis mortar, dan menunjukkan adanya korelasi yang sesuai antara mortar GT-25 dan mortar PPC, bahwa semakin kecil nilai porositas memberikan nilai kuat tekan yang lebih besar (Sultan, *et al.*, 2018). Persentase pori yang lebih kecil membuat tingkat penyerapan air ke dalam mortar menjadi lebih kecil dan menjadikan kualitas mortar semakin baik.



Gambar 4. Grafik perbandingan porositas dan kuat tekan

Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan setiap variasi umur perendaman. Dengan variasi umur rendaman 0 hari, 14 hari, 28 hari, 56 hari, dan 100 hari akan dibandingkan hasilnya serta laju perkembangannya seiring lamanya perendaman. Grafik hasil kuat tekan mortar tanpa dan setelah perendaman larutan asam sulfat pH 4 terdapat pada Gambar 5.



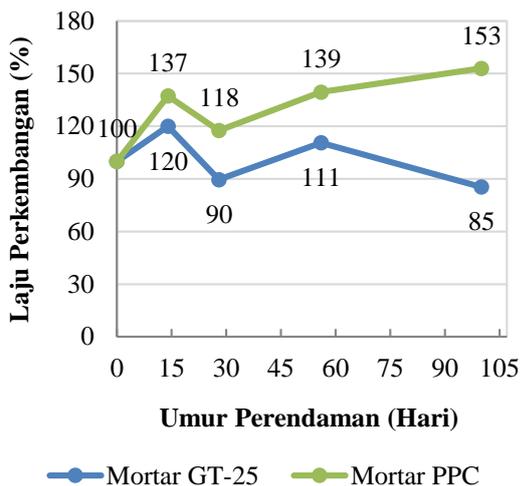
Gambar 5. Uji kuat tekan setelah perendaman

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa saat posisi belum direndam, larutan asam PH 4 mortar geopolimer dengan substitusi tanah putih 25% (GT-25) memiliki kuat tekan 16,35 MPa, sedangkan mortar dengan semen PPC sebesar 13,14 MPa. Dalam umur 14 hari rendaman, kekuatan tekan kedua jenis mortar tersebut sama-sama masih mengalami peningkatan kekuatan masing sebesar 20% dan 37% untuk GT-25 dan mortar PPC. Saat umur perendaman 28 hari mortar GT-25 menunjukkan penurunan kekuatan 10% dibanding kondisi sebelum perendaman, sedangkan pada mortar PPC sedikit meningkat kuat tekannya sebesar 18% dari kondisi sebelum direndam. Dilihat dari rentang perendaman hingga 100 hari untuk mortar geopolimer masih menunjukkan pola yang fluktuatif (naik turun) sedangkan pada mortar PPC perendaman pada kondisi asam dengan PH 4 tidak menunjukkan adanya penurunan kuat tekan dibanding saat sebelum direndam. Kestabilan kinerja mortar PPC ini salah satunya disebabkan karena panas hidrasi mortar PCC yang lebih rendah sehingga proses hidrasi berjalan lebih lama sehingga proses pengerasan masih terus berlangsung.

Analisis laju perkembangan dilakukan dengan menghitung persentase nilai kuat tekan mortar yang direndam terhadap benda uji umur rendaman 0 hari (tanpa rendaman). Hasil kuat tekan mortar yang didapatkan pada keempat variasi umur perendaman dibagi dengan kuat tekan mortar jenis yang sama tanpa rendaman yang dianggap sebagai nilai kelajuan 100% kekuatan. Maka akan dapat

digambarkan kenaikan atau penurunan nilai kuat tekan dibandingkan sebelum perendaman. Grafik laju perkembangan kuat tekan kedua jenis mortar tersebut terdapat pada Gambar 6.

Hasil analisis Gambar 6 tentang laju perkembangan kuat tekan mortar GT-25 dan mortar PPC yang direndam pada larutan asam sulfat pH 4 terlihat ada perilaku yang berbeda dari kedua jenis mortar. Setelah rendaman 100 hari, mortar PPC mengalami kenaikan nilai perkembangan tertinggi mencapai 153% dibanding mortar GT-25 yang mengalami penurunan terendah dengan 85%.



Gambar 6. Laju perkembangan kuat tekan

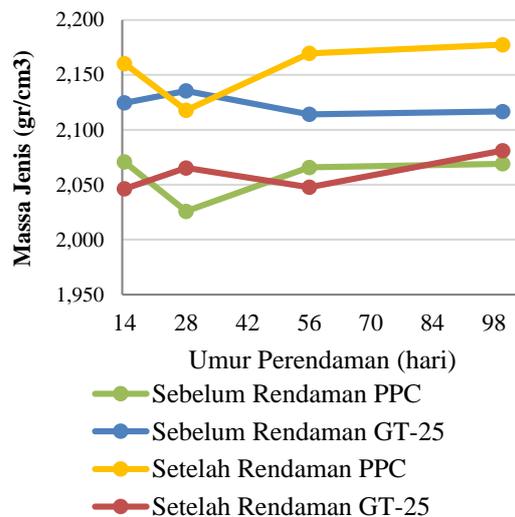
Hal ini menunjukkan bahwa rendaman larutan asam sulfat pH 4 tidak mempengaruhi kinerja kuat tekan dari mortar PPC karena kekuatan tidak berkurang setelah perendaman hingga 100 hari dan tidak mengalami penurunan kekuatan dibanding sebelum direndam / berada pada kondisi terpapar sulfat. Sebaliknya larutan asam sulfat ini lebih berdampak kepada mortar GT-25 karena penetrasi asam yang lebih tinggi / cepat ke akibat adanya retak pada permukaan atas mortar sehingga degradasi kekuatan akan meningkat. Banyaknya pori-pori pada mortar GT-25 setelah terpapar asam dibanding mortar PPC menyebabkan air rendaman lebih banyak masuk dan tertahan di dalam mortar GT-25. Oleh karena itu, mortar PPC lebih tahan terhadap larutan asam sulfat pH 4 dibandingkan mortar GT-25.

Pengujian densitas

Massa jenis digunakan sebagai perhitungan untuk mendapatkan kerapatan suatu benda yang diambil dari data massa dan volume benda uji mortar kubus. Hasil perhitungan yang akan dibandingkan yaitu sebelum dan setelah perendaman pada benda

uji yang sama. Grafik perbandingan massa jenis kedua variasi sebelum dan setelah perendaman terdapat pada Gambar 7.

Berdasarkan Gambar 7 terlihat bahwa massa jenis sebelum perendaman variasi GT-25 lebih tinggi dibandingkan variasi PPC. Sebagai perbandingan, massa jenis benda uji GT-25 sebelum perendaman dapat mencapai 2,135 gr/cm³ dan benda uji PPC hanya mencapai 2,071 gr/cm³. Berbeda dengan setelah perendaman, massa jenis variasi PPC lebih tinggi dibanding variasi GT-25 yang mengalami penurunan massa jenis setelah perendaman. Dari hasil ini didapatkan kerapatan tertinggi diantara seluruh benda uji setelah perendaman yaitu variasi PPC dengan 2,177 gr/cm³ pada umur rendaman 100 hari.



Gambar 7. Perbandingan massa jenis sebelum dan setelah perendaman

Pada mortar GT-25 selalu mengalami penurunan massa jenis seiring bertambah umur rendaman. Penurunan ini dapat diakibatkan dari penetrasi asam pada mortar. Penetrasi asam sulfat yang terjadi pada mortar ini lebih cepat akibat adanya retak permukaan dan hasil pengujian pori yang lebih besar dibanding mortar PPC. Kerusakan akan terjadi lebih cepat dengan ditandai penurunan nilai massa jenis.

Berbeda dengan mortar GT-25, pada mortar PPC yang masih terus mengalami kenaikan massa jenis seiring bertambah umur rendaman. Meskipun mengalami kenaikan massa jenis yang dapat diartikan secara umum bahwa kerapatan material meningkat setelah perendaman asam sulfat, hal ini belum cukup untuk membuktikan dan menjelaskan apakah asam mampu membuat kerapatan material PPC lebih baik. Faktor kering dari air rendaman saat penimbangan menjadi penting untuk hasil

kerapatan karena air yang masih tertahan di dalam mortar membuat massa lebih berat.

Berdasarkan kondisi lingkungan yang tergolong lembab saat pengeringan 24 jam, memungkinkan benda uji belum sepenuhnya kering. Sehingga jika mortar PPC memiliki ketahanan yang baik pada kondisi asam dan tidak mengalami kerusakan serta kondisi benda uji kering sepenuhnya saat pengujian, hasil massa yang didapatkan sama atau mendekati sebelum perendaman. Tetapi dari hasil yang telah didapat terlihat bahwa serangan asam sulfat pH 4 tidak memberikan dampak dalam mengurangi atau merusak kerapatan variasi PPC dan rendaman asam sulfat pH 4 memungkinkan dalam meningkatkan kerapatan material PPC.

Pengujian kuat tarik langsung

Nilai kuat tarik mortar dapat diperoleh dari perhitungan besar gaya tarik maksimum (N) dibagi dengan luas penampang (mm²). Luasan efektif benda uji tarik adalah luasan persegi yaitu 26,5 mm x 26,1 mm = 691,65 mm² (Latief, 2010). Pengujian ini dilakukan pada mortar *dogbone* pada umur rendaman 28 hari pada larutan asam sulfat pH 4. Pada Tabel 3 menunjukkan hasil pengujian kuat tarik langsung mortar dan persentase kekuatannya antar variasi.

Tabel 3. Nilai kuat tarik langsung

Variasi Mortar	Kuat Tarik (MPa)	Persentase GT-25 terhadap PPC (%)
GT-25	0,501	13,16
PPC	3,807	

Berdasarkan Tabel 4 hasil kuat tarik langsung dapat menunjukkan bahwa ketahanan tarik mortar GT-25 sebesar 13,16% dari ketahanan tarik mortar PPC. 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. 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).

Adapun faktor rendahnya nilai kuat tarik langsung dapat dipengaruhi bentuk kurang rapi dan keropos pada pertemuan sisi datar dan samping mortar *dogbone* setelah pembongkaran sehingga memposisikan benda uji cukup sulit agar tetap presisi saat pengujian. Faktor rendah kuat tarik

lainnya pada variasi GT-25 dapat disebabkan adanya keretakan yang menyebar pada satu sisi datar sehingga mempermudah terjadinya putus akibat tarik. Sebagai perbandingan kuat tarik terhadap kuat tekan, dapat dibandingkan hasil kedua pengujian pada umur rendaman yang sama yaitu 28 hari untuk melihat korelasinya. Pada Tabel 4 menunjukkan perbandingan hasil pengujian kuat tarik dan kuat tekan.

Tabel 4. Perbandingan kuat tarik dan kuat tekan

Variasi mortar	Kuat tarik (mpa)	Kuat tekan (mpa)	Persentase kuat tarik terhadap kuat tekan (%)
GT-25	0,501	14,65	3,42
PPC	3,807	15,45	24,64

Pada Tabel 4 didapatkan persentase kuat tarik langsung mortar GT-25 terhadap kuat tekan sebesar 3,42% dan persentase kuat tarik langsung mortar PPC terhadap kuat tekan sebesar 24,64%. Selain itu nilai kuat tarik dan kuat tekan diatas menunjukkan semakin besar nilai kuat tekan menghasilkan nilai kuat tarik yang lebih besar. Pada penelitian sebelumnya (Priastiwi, *et al.*, 2021) setelah perendaman larutan asam sulfat kadar 10%, didapatkan persentase perbandingannya sebesar 6,21% untuk substitusi tanah putih 25%. Sedangkan pada mortar PPC tidak didapatkan hasil kuat tarik akibat benda uji hancur sebelum pengujian. Dari hal ini menunjukkan bahwa mortar PPC dapat bertahan setelah perendaman asam sulfat pH 4 dan menghasilkan persentase lebih baik terhadap kuat tekan dibanding mortar GT-25.

Pengamatan massa dan bentuk fisik

Pengamatan terhadap perubahan massa dan bentuk fisik mortar GT-25 dan PPC dilakukan untuk mengetahui pengaruh pengovenan dan perendaman larutan asam sulfat. Dengan beberapa aspek yang telah direncanakan dan diamati selama penelitian dilakukan dapat dilakukan analisis menggunakan hasil observasi langsung dan perbandingan dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya.

Massa

Penimbangan seluruh benda uji yang dilakukan sebelum dan setelah perendaman menjadi dasar analisa pada Tabel 5. Dengan total benda uji yang dapat dibandingkan sejumlah 30 buah, terbagi menjadi 15 buah variasi geopolimer tanah putih 25% (GT-25) dan 15 buah variasi semen PPC. Berdasarkan hasil tersebut didapatkan seluruh massa variasi PPC mengalami peningkatan dan seluruh massa variasi GT-25 mengalami penurunan setelah perendaman. Pada dasarnya

dengan berkurangnya massa variasi GT-25 setelah perendaman dapat disebabkan mortar variasi ini kurang mampu bertahan terhadap serangan asam. Sehingga kerusakan pada mortar dapat terjadi dengan terkikisnya permukaan atau bagian dalam melalui pori mortar yang mampu mengurangi massa mortar seiring lamanya umur perendaman. Pada variasi PPC yang mengalami kenaikan massa setelah perendaman dapat disebabkan beberapa faktor diantaranya material PPC yang lebih adaptif terhadap kondisi korosif seperti asam sulfat pH 4. Hal lainnya yang memungkinkan ialah masih tertahannya kadar air pada mortar PPC, meskipun telah dikeluarkan 1 hari sebelum penimbangan membuat mortar belum sepenuhnya kering dari air rendaman. Faktor lingkungan yang lembab saat pengeringan juga mempengaruhi lamanya mortar mencapai kondisi kering.

Tabel 5. Perbandingan Massa Sebelum dan Setelah Perendaman

Kondisi Mortar	Massa (gram)		Keterangan
	GT-25	PPC	
Sebelum Perendaman	259,75	248,70	Terkecil
	270,55	263,90	Terbesar
	264,57	256,52	Rata-rata
Setelah Perendaman	250,55	261,30	Terkecil
	262,05	274,70	Terbesar
	256,53	268,39	Rata-rata

Retak

Variasi GT-25 yang memiliki retak permukaan dengan pola menyebar dan merata terlihat jelas setelah dilakukannya *dry curing* atau perawatan kering menggunakan oven bersuhu 60°C selama 24 jam. Pengovenan yang dilakukan setelah pembongkaran mortar dari bekisting 1 hari sejak pengecoran ternyata bukan penyebab utama keretakan. Faktor penyebab keretakan terdapat pada campuran mortar GT-25 dimana menggunakan

campuran *fly ash*, tanah putih, pasir, dan larutan aktivator NaOH serta Na₂SiO₃ pada FAS 0,5. Campuran mortar GT-25 yang dihasilkan saat pembuatan lebih encer dibandingkan campuran mortar PPC. Hal ini juga ditunjukkan pada benda uji yang lebih basah, lebih berminyak pada permukaan GT-25 saat pembongkaran. Hal ini dapat terlihat keretakan sebelum pengovenan pada Gambar 8 dan setelah pengovenan pada Gambar 9. Berdasarkan pengamatan keretakan pada variasi GT-25 maupun PPC setelah perendaman larutan asam sulfat pH 4 tidak ada penambahan keretakan baru atau sisi permukaan lain akibat serangan

asam. Oleh karena itu serangan asam tidak berdampak terhadap keretakan kedua variasi.



Gambar 8. Keretakan awal mortar GT-25 sebelum pengovenan



Gambar 9. Keretakan akhir mortar GT-25 setelah pengovenan

Keropos

Berdasarkan hasil observasi kedua variasi, secara visual terlihat bahwa keropos permukaan yang terjadi pada mortar PPC lebih besar dibandingkan mortar GT-25. Selain keropos, mortar PPC memiliki tekstur permukaan lebih kasar dibandingkan mortar GT-25. Warna lebih terang pada PPC dihasilkan dari penggunaan material semen portland pozzolan dan warna gelap pada GT-25 dihasilkan dari penggunaan *fly ash* mencapai 75% dari proporsi binder. Pada Gambar 10 menunjukkan perbandingan permukaan kedua variasi pada setelah perendaman.

Berdasarkan uji pendahuluan penelitian sebelumnya (Priastiwi, *et al.*, 2021) dijelaskan bahwa bahan aktivator Na₂SiO₃ mampu mengatasi permukaan mortar geopolimer yang lapuk pada penelitian sebelumnya. Bahan kimia inilah yang membuat mortar GT-25 menjadi halus dan tidak lapuk. Oleh karena itu berbeda dengan variasi PPC yang tidak menggunakan aktivator Na₂SiO₃ sehingga memiliki permukaan lebih kasar. Faktor

lainnya yang mempengaruhi tingkat keropos variasi PPC dapat disebabkan nilai FAS yang rendah sehingga campuran mortar dihasilkan lebih kental dibanding GT-25. Perendaman larutan asam sulfat pH 4 terhadap kedua variasi memberikan keropos ringan pada kedua variasi dengan terlihatnya serpihan mortar pada plastik pemisah umur rendaman.



Gambar 10. Permukaan mortar PPC (Kiri) dan GT-25 (Kanan)

Lapisan putih

Pada saat benda uji GT-25 berumur 21 hari setelah sebelumnya dirawat selama 14 hari menggunakan karung goni basah ditemukan adanya bintik-bintik putih yang menyebar di permukaan terbuka udara. Gabungan beberapa bintik putih ini akan membentuk sebuah lapisan putih. Lapisan putih ini dapat dibersihkan dengan mudah menggunakan tangan atau kain basah.

Wang (2020) menyatakan bahwa lapisan putih ini dapat disebut *efflorescence* yang dihasilkan dari reaksi larutan alkali berlebihan dan beberapa komposisi kimia pada bahan geopolimer yang mengendap pada permukaan mortar dengan CO_2 dari udara. Longhi (2021) menyatakan bahwa ion Na^+ dan K pada alkali aktivator dianggap sebagai parameter yang berpengaruh besar. Berdasarkan pengecekan *properties* yang terkandung pada penelitian sebelumnya (Qian, *et al.*, 2022; Srinivasamurthy, *et al.*, 2022; Chen & Qian, 2021) ditemukan komposisi Ca, Al dan Si memberikan pengaruh besar.

Pada penelitian ini variasi GT-25 maupun PPC melakukan kontak dengan CO_2 dari udara pasca *curing* karung goni basah 14 hari memiliki perilaku yang berbeda. Variasi PPC tidak menunjukkan adanya lapisan putih pada permukaan karena tidak ada kandungan kimia Al, Si, dan Ca serta alkali aktivator pada campuran mortarnya. Berbeda dengan variasi GT-25 yang menggunakan tanah putih memiliki kandungan kimia CaO mencapai 56,19% (Hunggurami, *et al.*, 2015) dan *fly ash* dari PLTU Tanjung Jati B Jepara memiliki kandungan kimia SiO_2 mencapai 46,52% dan Al_2O_3 mencapai 24,95% (Mulyana, *et al.*,

2017). Pada Gambar 11 menunjukkan lapisan putih mortar GT-25 sebelum dan setelah rendaman. Menurut Wang (2020), larutan alkali yang telah menyebar pada permukaan akan tetap bereaksi semuanya seiring lamanya waktu kontak dengan CO_2 dari udara dan belum ditemukan hingga saat ini dampak negatif seperti menurunnya kekuatan atau penambahan kerusakan akibat lapisan putih ini. Dari hal ini dapat dikatakan bahwa lapisan putih yang tetap muncul pada permukaan GT-25 setelah perendaman menunjukkan kandungan kimia yang mempengaruhi masih tertahan pada permukaan mortar GT-25.



Gambar 11. Lapisan putih sebelum (Kiri) dan setelah rendaman (Kanan)

Kesimpulan

Ketahanan mortar semen portland pozzolan (PPC) lebih baik dibanding mortar geopolimer substitusi tanah putih 25% (GT-25) setelah perendaman dalam larutan asam sulfat pH 4. Perendaman terhadap asam sulfat pH 4 memberikan pengaruh menurunkan kekuatan pada mortar GT-25 namun tidak menurunkan kekuatan pada mortar PPC dibanding saat sebelum direndam. Hal ini ditunjukkan dengan mortar PPC lebih baik dengan porositas 4,15%, kuat tekan mencapai 20,10 MPa pada usia 100 hari yang dapat dikategorikan mortar paling baik yaitu tipe M, kerapatan yang meningkat hingga 5,24%, dan kuat tarik langsung lebih besar mencapai 3,80 MPa.

Perendaman larutan asam sulfat pH 4 memberikan pengaruh besar pada perubahan massa tetapi kecil terhadap perubahan bentuk fisik kedua jenis mortar. Peningkatan massa terjadi pada mortar PPC yang mencapai 268,39 gram dari 256,52 gram setelah perendaman dan sebaliknya penurunan massa terjadi pada mortar GT-25 dengan 256,53 gram dari 264,57 gram. Keretakan, keropos, dan lapisan putih yang muncul pada bentuk fisik mortar disebabkan utamanya karena proporsi campuran material belum tepat, teknik perawatan benda uji, zat kimia yang terkandung dalam material serta kelembapan lingkungan penyimpanan benda uji.

Ucapan Terima Kasih

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

Daftar Pustaka

ASTM C307-03. (2004). *Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing*. ASTM International. United States.

ASTM C33-C33M. (2013). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International. United States.

ASTM C642-06. (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. ASTM International. United States.

Chen, Y., Ji, T., Yang, Z., Zhan, W., & Zhang, Y. (2020). Sustainable use of ferronickel slag in cementitious composites and the effect on chloride penetration resistance. *Construction and Building Materials*, 240, 117969.

Chen, Y., & Qian, C. (2021). A new method for anti-efflorescence of mortar by bio-mineralization. *Construction and Building Materials*, 290, 123261.

Davidovits, J. (2020). *Geopolymer Chemistry and Applications - 5th Edition*. Institut Geopolymere: Saint-Quentin.

Global Wetlands International. (2019). Warta Konservasi Lahan Basah.,27(3)https://indonesia.wetlands.org/wpcontent/uploads/sites/6/dlm_uploads/2020/10/WKLB-Vol.-27-No.-3-September-2019.pdf

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.

Ikomudin, R.A., Herbudiman, B., Irawan, R.R. (2016). Ketahanan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash terhadap Sulfat dan Klorida. *Jurnal Teknik Sipil ITENAS*, 2(4), 33-43.

Islami, A.N., Saputra, E., Olivia, M. (2015). Kajian Parameter Mortar Geopolimer Menggunakan Campuran Abu Terbang (Fly Ash) dan Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash). *Prosiding 2nd Andalas Civil Engineering National Conference*, 160-7.

Komnitsas, K., Bartzas, G., Karmali, V., Petrakis, E., Kurylak, W., Pietek, G., & Kanasiwicz, J. (2019). Assessment of alkali activation potential of a Polish ferronickel slag. *Sustainability*, 11(7), 1863.

Kuri, J. C., Khan, M. N. N., & Sarker, P. K. (2021). Fresh and hardened properties of geopolymer binder using ground high magnesium ferronickel slag with fly ash. *Construction and Building Materials*, 272, 121877.

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%; 30%; 40%, *Skripsi*, Depok: *Universitas Indonesia*.

Longhi, M. A., Zhang, Z., Walkley, B., Rodríguez, E. D., & Kirchheim, A. P. (2021). Strategies for control and mitigation of efflorescence in metakaolin-based geopolymers. *Cement and Concrete Research*, 144, 106431.

Mulyana, F., Yolanda, T., Nurhuda, I. & Nuroji. (2017). Studi Beton Geopolimer Sebagai Substitusi Beton Konvensional. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 11*, 137-46.

Pandiangan, J. A., Olivia, M. & Darmayanti, L. (2014). Ketahanan Beton Mutu Tinggi di Lingkungan Asam, *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*, 1(1), 1-11.

Pradana, T., Olivia, M., Sitompul, I.R. (2016). Kuat Tekan dan Porositas Beton Semen OPC, PCC, dan OPC POFA di Lingkungan Gambut. *Jom FTEKNIK*, 3(2), 1-10.

Priastiwi, Y. A., Hidayat, A., Daryanto, D., Salamsyah, 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.

Priastiwi, Y. A., Hidayat, A., Rinaldo & Sendrika, D. B. (2021). Ketahanan Mortar Semen PPC dan Mortar Geopolimer dengan Substitusi Tanah Putih pada Rendaman H₂SO₄. *ASTONJADRO Jurnal Rekayasa Sipil*, 10(2).

Putra, A. K., Wallah, S. E. & Dapas, S. O. (2014). Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang (Fly Ash). *Jurnal Sipil Statik*, 2(7), 330-36.

Qian, C., Zhang, X., Chen, Y., Xue, B. (2022) *Microbial Mineralization at the Surface Layer of Cement-based Materials and its Effect on*

- Efflorescence Performance*. Nanjing: *Journal of Building Engineering-Science Direct*, 52, 104480.
- Samadhi, T.W., Hardika, R.C., Liustanto, R. (2016). Pengembangan Bahan Geopolimer dengan Pemanfaatan Limbah Anorganik. *Jurnal Keramik dan Gelas Indonesia*, 25(1), 18-28.
- Sandya, Y., Prihantono., Musalamah, S. (2019). Penggunaan Abu Sekam Padi sebagai Pengganti Semen pada Beton Geopolimer. *Jurnal Pendidikan Teknik Bangunan dan Sipil*, 5(2), 59-63.
- Saputra, D. A., Rahman, F., Ay Lie, H. & Purwanto. (2018). Studi Experimental Pengaruh Perbedaan Molaritas Aktivator pada Perilaku Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash, *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 7(1), 89-98.
- SNI 03-6852-2002. (2002). Metode Pengujian Kekuatan Tekan Mortar Semen Portland Untuk Pekerjaan Sipil, *Badan Standarisasi Nasional*.
- SNI 2049-2015. (2015). Semen Portland, *Badan Standarisasi Nasional*.
- SNI 1973:2016. (2016). Metode Uji Densitas, Volume Produksi Campuran dan Kadar Udara (gravimetrik) Beton, *Badan Standarisasi Nasional*.
- Srinivasamurthy, L., Chevali, V.S., Zhang, Z., Longhi, M.A., Loh, T.W., Wang, H. (2022). *Mechanical Property and Microstructure Development in Alkali Activated Fly Ash Slag Blends due to Efflorescence*. Springfield Central: *Construction and Building Materials-Science Direct*, 332, 127273.
- Sultan, M. A., Imran & Litolily, F. (2018). Korelasi Porositas Beton Terhadap Kuat Tekan Rata-rata, *Jurnal Teknologi Sipil*, 2(2), 57-63.
- Surja, R.T., Mintura, R., Antoni., Hardjito, D. (2017). Perbandingan Beberapa Prosedur Pembuatan Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Tipe C, *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, 6(2), 185-91.
- Wahyuni., Subaer., Nurhayati. (2020). Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Terhadap Struktur dan Sifat Mekanik Geopolimer Berbasis Fly Ash. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika*, 16(2), 171-80.
- Wang, Y. et al. (2020). *Effect of Si/Al Ratio on the Efflorescence and Properties of Fly Ash Based Geopolymer*, Beijing: *Journal of Cleaner Production-Science Direct*, 244, 118852.
- Widyananto, E., Alami, N., Setyani, Y. (2017). Analisa Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Abu Sekam Padi dan Kapur Padam, *The 6th University Research Colloquium 2017*, 183-1888.
- Wallah, S.E. (2014). Pengaruh Perawatan dan Umur terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Abu Terbang, *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 4(1), 1-7.
- Wulandari, C., Olivia, M., & Sitompul, I. R. (2015). Durabilitas Mortar Geopolimer Di Air Gambut. *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Teknik dan Sains*, 2(2), 1-15.