*Journal of Research and Public Horizons*
*Volume:2, Nomor: 2, (2026), Desember: 225 - 254*
*Link Publish: https://ejournal.lppnusantara.com/index.php/jrph/article/view/1135*
*E-ISSN: 3123-9595; DOI: https://doi.org/10.65244/jrph.v2i2.1135*

# SIFAT FISIK DAN MEKANIS MORTAR GEOPOLIMER

**Azhadin Arvan Safari[1], Imas Toha[2], Sumirin[3], Muhammad Rusli Ahyar[4]**
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia [1,2,3,4]
*Corresponding Author: azhadinarvan56@gmail.com*

***Info Artikel***
***Submitted:*** *29 September 2026*
***Revised :*** *23 Oktober 2026*
***Accepted:*** *23 November 2026*
***Published:*** *29 November 2026*

***Keywords:*** *Geopolymer Mortar, Fly Ash, Compressive Strength, Porosity, Absorption*

***Kata Kunci****: Mortar Geopolimer, Fly ash, Kuat Tekan, Porositas, Absorpsi*

***Abstract***
*Geopolymer mortar is an environmentally friendly alternative, as it eliminates cement use thereby reducing CO2 emissions and utilizes fly ash waste from coal-fired power plants. This study aims to determine the effects of high-temperature, room-temperature, and field curing on the compressive strength, porosity, and absorption of geopolymer mortar using 100% fly ash and 15% PPC cement substitution (1:3 ratio, water-binder factor of 0.5, 8M NaOH), with the goal of producing construction products such as grouting materials or crack and void fillers. Compressive strength was tested at 7, 14, and 28 days, while porosity and absorption were tested at 14 days. Results showed the highest compressive strength of 30.87 MPa in the 15% PPC-substituted mortar at 28 days under 60°C high-temperature curing, with a porosity of 17.29% and absorption of 9.88%, classifying it as Type M mortar (minimum compressive strength of 17.2 MPa).*

***Abstrak***
*Mortar geopolimer merupakan alternatif ramah lingkungan karena tidak menggunakan semen penghasil emisi CO2 dan memanfaatkan limbah fly ash PLTU. Penelitian ini bertujuan mengetahui pengaruh perawatan suhu tinggi, ruangan, dan lapangan terhadap kuat tekan, porositas, dan absorpsi mortar geopolimer 100% fly ash maupun substitusi semen PPC 15% (perbandingan 1:3, faktor air binder 0,5, NaOH 8M), guna menghasilkan produk konstruksi seperti bahan grouting atau penambal celah retak. Kuat tekan diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari, sedangkan porositas dan absorpsi pada umur 14 hari. Hasil menunjukkan kuat tekan tertinggi sebesar 30,87 MPa pada mortar substitusi PPC 15% umur 28 hari dengan perawatan suhu tinggi 60°C, dengan porositas 17,29% dan absorpsi 9,88%, sehingga tergolong mortar tipe M (kuat tekan minimum 17,2 MPa).*

***This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.***
***Publisher: Lembaga Penerbit Penelitian Nusantara***

## PENDAHULUAN

Penggunaan semen, yang menghasilkan emisi karbon dioksida (CO2), merupakan penyebab utama timbulnya masalah tertentu dalam penggunaan mortar pada konstruksi bangunan. Oleh karena itu, diperlukan bahan pengganti untuk mortar konvensional, khususnya yang lebih ramah lingkungan dalam proses pembuatannya. Salah satu pilihannya adalah menggunakan *Semen Portland-Pozzolan* (PPC) sebagai pengganti semen Portland (Tipe II atau V). Standar SNI 15-0302-2004 mendefinisikan PPC sebagai jenis semen hidrolis yang terbuat dari campuran homogen antara semen Portland dan pozzolan halus. Campuran ini dibuat melalui proses penggilingan bersama antara klinker semen Portland dan pozzolan, pencampuran secara menyeluruh antara bubuk semen Portland dan bubuk pozzolan, atau

kombinasi antara penggilingan dan pencampuran, dengan ketentuan bahwa kandungan pozzolan mencakup antara 6% hingga 40% dari total massa *Semen Portland-Pozzolan* tersebut. Komponen silikat dan aluminat yang reaktif merupakan penyusun utama pozolan, yaitu suatu bahan yang terbentuk secara alami. Batu apung, skoria, dan abu vulkanik adalah contoh bahan alami yang dapat digunakan untuk membuat semen pozolan (Murdock dan Brook, 1979).

Diperlukan alternatif berupa material geopolimer untuk mengurangi emisi karbon dioksida, karena penggunaan *Semen Portland-Pozzolan* dinilai tidak memadai untuk menurunkan emisi tersebut secara signifikan. Geopolimer merupakan material pozzolanik yang terbentuk melalui reaksi pengikatan mineral yang kaya akan silika dan aluminium. Kandungan silika dan aluminium yang tinggi menjadikan abu terbang *fly ash* sebagai bahan pengganti yang baik untuk geopolimer. Abu terbang adalah residu halus menyerupai debu yang dihasilkan dari pembakaran batu bara di pembangkit listrik tenaga termal. Mengingat abu terbang menghasilkan emisi gas rumah kaca (karbon dioksida) 80% hingga 90% lebih rendah dibandingkan semen Portland, material ini dianggap sebagai salah satu cara untuk mengurangi pemanasan global (Davidovits, 1994). Masalah pencemaran akibat limbah batu bara juga dapat diatasi dengan memanfaatkan abu terbang *fly ash* sebagai bahan dasar geopolimer.

Dalam penelitian terdahulu, abu terbang telah banyak diteliti sebagai bahan untuk semen dan beton geopolimer. Menurut penelitian Samadhi dan Pratama (2013), abu terbang menghasilkan waktu pengerasan dan kuat tekan yang lebih baik saat digunakan sebagai bahan baku geopolimer dibandingkan dengan metakaolin bahan yang diperoleh melalui kalsinasi mineral kaolin serta memiliki konsentrasi SiO2 dan Al2O3 yang tinggi. Hasil kuat tekan mortar geopolimer berbahan dasar abu terbang diperoleh kuat tekan sebesar 44,55 MPa dengan suhu pematangan 80ºC, sedangkan untuk hasil kuat tekan mortar geopolimer berbahan dasar metakaolin dan mortar OPC dengan suhu pematangan yang sama diperoleh hasil sebesar 17,18 MPa dan 31,27 MPa. Selain itu penggunaan abu terbang dalam pembuatan mortar geopolimer juga menghasilkan daya tahan termal yang lebih baik (Samadhi & Pratama, 2013).

Karena abu terbang membutuhkan aktivator alkali (larutan KOH atau NaOH dengan K2SiO3 atau Na2SiO3) untuk memicu reaksi polimerisasi Si dan Al (Lloyd & Rangan, 2010), beberapa penelitian sebelumnya membandingkan jenis dan konsentrasi aktivator: Priastiwi dkk. (2021) mencatat kuat tekan 28 hari sebesar 10,14 MPa dengan KOH dan 14,15 MPa dengan Na2SiO3; Priastiwi dkk. (2020) memperoleh 22,53 MPa dengan NaOH, yang menghasilkan kuat tekan tertinggi dibanding kedua aktivator lain. Erlando dkk. (2019) menemukan bahwa konsentrasi NaOH yang lebih tinggi (rasio Na2SiO3:NaOH 2,5) memperlama waktu pengikatan awal namun mempercepat pengikatan dan meningkatkan kuat tekan pada komposisi Na2SiO3 tetap, meski kuat tekan menurun jika NaOH melebihi 10M. Rusan dkk. (2020), menggunakan campuran 85% fly ash dan 15% abu sekam padi dengan NaOH 15M, memperoleh kuat tekan 28 hari tertinggi 3,13 MPa pada curing suhu ruang, dengan pengerasan lebih cepat pada molaritas lebih tinggi.

Temuan-temuan ini mendorong penulis mengkaji karakteristik mekanis dan fisik mortar geopolimer berbahan 85% dan 100% fly ash dengan variasi metode curing (suhu tinggi, ruang, dan lapangan) dalam penelitian "Sifat Fisik dan Mekanis Mortar Geopolimer". Meski proses pembuatannya lebih mahal dan kompleks dibanding mortar konvensional, kuat tekan mortar geopolimer yang lebih tinggi diharapkan menjadikannya solusi pengganti bahan grouting serta bahan perbaikan beton retak dan keropos.

## METODE PENELITIAN

### 1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini adalah metode eksperimental sebagai bagian dari pendekatan kuantitatif untuk menguji pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat melalui manipulasi dan pengendalian variabel secara sistematis, guna mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antarvariabel yang diteliti. Sampel mortar geopolimer dibuat dalam dua variasi, yaitu 100% fly ash dan 85% fly ash, dengan komposisi 1 Pca : 3 Ps dan faktor air binder 0,5. Pca merupakan bahan pengikat berupa fly ash dan semen PPC, dengan aktivator NaOH 8M. Benda uji selanjutnya dirawat selama 28 hari melalui tiga metode perawatan, yaitu suhu tinggi, suhu ruangan, dan suhu lapangan, sebelum dilakukan pengujian. Pengendalian terhadap variabel-variabel lain yang berpotensi memengaruhi hasil dilakukan untuk memperoleh kesimpulan yang valid mengenai hubungan sebab-akibat antara perlakuan dan variabel terikat.

### 2. Bahan dan Peralatan Penelitian

#### a. Bahan Penelitian

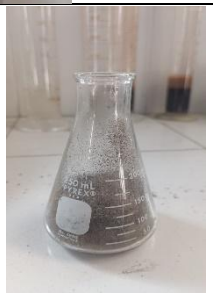
**Tabel 1. Bahan Penelitian**

| No. | Bahan | Gambar |
|---|---|---|
| 1 | Abu terbang *fly ash* digunakan sebagai pengganti semen. |  |
| 2 | *Semen Portland-Pozzolan*, yang memiliki kandungan pozzolan berkisar antara 6% hingga 40% dari total massa. |  |
| 3 | Agregat halus yang digunakan pada penelitian adalah pasir yang berasal pada daerah Muntilan, Yogyakarta. Pasir yang digunakan harus memenuhi syarat ASTM C33/C33M yang mana memiliki ukuran butiran maksimal 4,76 mm serta ukuran butir minimun sebesar 0,075 mm. |  |
| 4 | Sodium *Hidroksida* murni memiliki bentuk putih padat dan tersedia dalam bentuk pelet, serpihan, butiran ataupun berbentuk larutan jenuh 50% yang biasanya disebut larutan Sorensen |  |
| 5. | Air yang digunakan adalah air keran yang berasal dari air PDAM. Secara visual air tampak jernih, tidak berwarna, dan tidak berbau. |  |

**Sumber :** Dokumentasi Pribadi

**b. Alat Penelitian**

**Tabel 2. Alat Penelitian**

| No. | Alat | Gambar |
|---|---|---|
| 1 | Saringan Agregat Halus (1 Set) digunakan untuk mengetahui gradasi butiran agregat halus dan *fly ash* yang akan dicampur dalam proses pembuatan mortar |  |
| 2 | Timbangan digital digunakan untuk menimbang material pada saat pengujian properties dan material yang akan digunakan untuk pembuatan benda uji. |  |
| 3 | Oven digunakan untuk mengeringkan agregat halus dan *fly ash* dalam pengujian properties. |  |
| 4 | cetakan mortar yang digunakan berukuran 5 x 5 x 5 cm yang terbuat dari multiplek. Penggunaan cetakan mortar ukuran 5 x 5 x 5 cm mengacu pada SNI 03-6825-2002 dan ASTM C109 / C109M. |  |
| 5. | Gelas ukur berfungsi untuk mengukur volume air serta untuk analisis kadar lumpur yang terkandung dalam agregat halus sedangkan gelas *erlenmeyer* berfungsi untuk analisis berat jenis agregat halus *(specific gravity)*. |   |
| 6. | Labu ukur digunakan untuk menghitung pengujian berat jenis pada agregat halus. Labu ukur yang digunakan pada pengujian ini menggunakan kapasitas 500 ml. |  |

| | | |
|---|---|---|
| 7. | *Cone and stamp* digunakan untuk menentukan pasir dalam keadaan *Saturated Surface Dry* (SSD). |  |

**Sumber :** Dokumentasi Pribadi

**3. Pemeriksaan Karakteristik Material**

**a) Pemeriksaan Agregat Halus**

Setiap agregat halus harus sesuai dengan standart agregat yang telah memenuhi standart spesifikasi yang telah ditetapkan sebelum pembuatan benda uji dengan tujuan agar konstruksi bangunan lebih kuat dan awet. Maka dari itu dilakukan pemeriksaan agregat halus yang terdiri dari:

1) Pengujian kadar lumpur agregat halus berdasarkan dengan *SNI 03-6820-2002*
   a. Memasukkan benda uji kering oven ke dalam gelas ukur sebanyak 130 cc
   b. Menuangkan air ke dalam gelas ukur sampai meresap setinggi 200 cc
   c. Menutup mulut gelas ukur menggunakan plastik sampai rapat
   d. Mengocok gelas ukur selama ± 30 menit
   e. Mendiamkan selama ± 24 jam sehingga akan terlihat bahwa material yang berat mengendap di bagian bawah dan lumpur akan mengendap di bagian atas.
   f. Mengamati dan mencatat tinggi endapan benda uji dan lumpur (cc).
2) Pengujian kadar organik agregat halus berdasarkan dengan *SNI 03-2816-2014*
   a. Memasukkan benda uji kering ke dalam *erlenmeyer* ukuran 250 cc sampai setinggi ± 130 cc
   b. Menambahkan larutan NaOH 3% ke dalam *erlenmeyer* sampai meresap ke dalam benda uji (jenuh) setinggi ± 200 cc
   c. Menutup mulut *erlenmeyer* dengan plastic hingga rapat dan mengocok *erlenmeyer* tersebut selama ± 30 menit
   d. Mendiamkan selama 24 jam
   e. Mengamati dan mencatat hasil percobaan mengenai warna dan cocokkan dengan warna pada tintometer. Tintometer terdiri dari 5 tingkatan warna antara lain Bening (5), Kuning (8), Kuning kecoklatan (11), Coklat (14), Coklat kehitaman (16).
3) Pengujian kadar air agregat halus berdasarkan dengan *SNI 03-6819-2002*
   a. Memasukkan benda uji ke dalam cawan dan menimbang beratnya
   b. Menghitung berat bersih benda uji
   c. Mengeringkan benda uji ke dalam oven dengan suhu (110±5)ºC sampai berat tetap
   d. Menimbang benda uji yang telah dikeringkan (berat bersih)
   e. Menghitung kadar air benda uji.
4) Pengujian agregat halus lolos saringan berdasarkan dengan ASTM C33/C33M
   a. Menyiapkan benda uji kering sebanyak 1000 gram
   b. Menimbang masing-masing saringan dalam keadaan kosong dan bersih
   c. Menyusun saringan secara urut, dengan diameter lubang terbesar berada diatas
   d. Menuangkan benda uji ke dalam saringan paling atas. Penyaringan dilakukan dengan cara menggoyangkan saringan selama 30 menit (secara manual) dan 10 menit (menggunakan mesin)
   e. Mendiamkan kurang lebih 5 menit setelah proses penmggoyangan selesai dengan tujuan debu dan pasir halus untuk mengendap
   f. Sisa benda uji di atas masing-masing saringan ditimbang dengan ketelitian 1 gram
   g. Mencatat hasil percobaan saringan dalam daftar tabel

h. Melakukan 2 kali percobaan dengan kehilangan berat maksimal 1% dari berat awal
i. Susunan saringan yang digunakan terdiri dari ayakan berukuran 9.5 mm, 4.76 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 0.6 mm, 0.3 mm, dan 0.075 mm.

5) Pengujian berat jenis agregat halus berdasarkan dengan *SNI – 03 – 6819 – 2002*
   a. Menimbang agregat dalam keadaan asli dan SSD sebanyak 500 gram dan memasukkan ke dalam gelas ukur (A)
   b. Menambahkan air bersih sampai pada tanda batas 500 gram
   c. Menimbang gelas ukur yang berisi air dan benda uji (C)
   d. Mengeluarkan benda uji dan air
   e. Mengisi kembali dengan air pada batas 500 gram lalu menimbangnya (B)
   f. Menghitung berat jenis benda uji = $\frac{A}{A+B-C}$

**b) Pemeriksaan *Fly ash***

Pemeriksaan *fly ash* harus sesuai dengan standart spesifikasi yang telah ditetapkan, sehingga konstruksi bangunan akan lebih kuat dan awet. Oleh karena itu dilakukan pemeriksaan *fly ash* yang terdiri dari :

1) Pengujian kandungan *fly ash* menggunakan *X-Ray Fluoresence* (XRF)

*Fly ash* diuji menggunakan metode X-ray fluorescence (XRF) sebelum digunakan. Tujuan pengujian ini adalah untuk melakukan analisis kuantitatif dan kualitatif terhadap komponen-komponen yang terkandung dalam *fly ash* tersebut. Spektrum unsur pada tingkat energi sinar-X tertentu memberikan informasi mengenai jenis-jenis unsur yang ada.

1. Pengujian kadar air *fly ash* berdasarkan dengan *SNI 03-1971-2011*
   a. Timbanglah benda uji setelah memasukkannya ke dalam gelas ukur.
   b. Tentukan berat benda uji (berat bersih).
   c. Keringkan benda uji di dalam oven yang diatur pada suhu 110±5°C hingga mencapai berat yang konstan.
   d. Tentukan berat bersih benda uji yang telah dikeringkan.
   e. Tentukan kadar air benda uji.
2. Pengujian kadar butiran *fly ash* lolos saringan no. 200 berdasarkan dengan *SNI 03-4142-1996*
   a. Siapkan sampel uji seberat 500 gram.
   b. Timbang setiap ayakan dalam keadaan bersih dan kosong.
   c. Susun ayakan secara berurutan, dengan diameter lubang terbesar berada di bagian paling atas.
   d. Tuangkan sampel uji ke dalam ayakan paling atas. Goyangkan susunan ayakan selama 30 menit (secara manual) atau 10 menit (menggunakan mesin) untuk menyelesaikan prosedur pengayakan.
   e. Biarkan susunan ayakan diam selama kurang lebih 5 menit setelah proses penggoyangan agar debu dan pasir halus mengendap.
   f. Timbang material yang tertahan pada setiap ayakan dengan tingkat ketelitian hingga satu gram.
   g. Catat hasil uji pengayakan dalam sebuah tabel.
   h. Lakukan pengujian sebanyak dua kali, dan pastikan bahwa kehilangan massa kurang dari 1% dari berat awal.
   i. Ayakan dalam susunan tersebut memiliki diameter lubang sebesar 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, dan 0,075 mm.

**c) Pemeriksaan *Semen Portland Pozzolan* Cemen (PPC)**

Pemeriksaan bahan semen harus sesuai dengan standard spesifikasi yang telah ditetapkan, sehingga konstruksi bangunan akan lebih kuat dan awet. Oleh karena itu dilakukan pemeriksaan semen yang terdiri dari :

1) Pengujian kadar butiran semen lolos saringan no. 200 berdasarkan dengan *SNI 03-4142-1996*
    a. Siapkan sampel uji seberat 500 gram.
    b. Setelah membersihkan dan mengosongkan setiap ayakan, timbanglah ayakan tersebut.
    c. Susun ayakan sedemikian rupa sehingga ayakan dengan diameter lubang terbesar berada di bagian paling atas.
    d. Masukkan sampel uji ke dalam ayakan paling atas. Goyangkan susunan ayakan selama 30 menit (secara manual) atau 10 menit (menggunakan mesin) untuk menyelesaikan prosedur pengayakan.
    e. Setelah proses pengoyangan selesai, diamkan susunan ayakan selama sekitar lima menit agar pasir halus dan debu dapat mengendap.
    f. Timbanglah material yang tertahan pada setiap ayakan secara akurat hingga ketelitian satu gram.
    g. Catat hasil uji pengayakan ke dalam tabel.
    h. Lakukan pengujian sebanyak dua kali dan pastikan bahwa kehilangan massa kurang dari 1% dari berat awal.
    i. Gunakan rangkaian ayakan dengan ukuran sebagai berikut: 9,5 mm, 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,6 mm, 0,3 mm, dan 0,075 mm.

## 4. Objek Penelitian

Pada penelitian ini menggunakan 2 variasi mortar geopolimer. Variasi mortar geopolimer yaitu mortar geopolimer dengan subtitusi PPC 15% dan mortar geopolimer 100% *fly ash*. Proporsi campuran yang digunakan pada mortar geopolimer subtitusi PPC 15% adalah 1 Pca : 3 Ps. Pca merupakan binder yang terdiri dari PPC 15% dan *fly ash* 85%, sedangkan untuk mortar geopolimer tanpa PPC memiliki proporsi campuran 1 Pca : 3 Ps dengan Pca terdiri dari 100% *fly ash*. Ps merupakan pasir. Alkali aktivator yang digunakan adalah NaOH 8M dengan nilai Faktor Air Binder (FAB) yaitu 0,5.

Jumlah benda uji yang dibuat pada setiap variasi mortar adalah 45 sampel berbentuk kubus 5x5x5 cm sehingga dengan objek penelitian 2 variasi mortar akan menghasilkan 90 benda uji. Pembagian 45 sampel benda uji tersebut dilakukan berdasarkan pengujian dengan 2 variasi benda uji pada masing masing pengujian. Pengujian setiap variabel membutuhkan 3 benda uji, hal ini dilakukan untuk mendapatkan data yang benar-benar akurat. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian kuat tekan mortar, pengujian porositas mortar, dan pengujian absorpsi mortar. Pengujian kuat tekan akan dilaksanakan pada mortar geopolimer dengan umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari. Di samping itu, untuk pengujian porositas dan absorpsi dilakukan saat mortar geopolimer berumur 14 hari. Semua benda uji akan dilakukan perawatan dengan metode perawatan terlebih dahulu sebelum dilakukan pengujian. Perawatan benda uji yang dilakukan yaitu perawatan suhu tinggi, perawatan suhu ruangan, dan perawatan suhu lapangan. Tabel 3.1 menunjukkan jumlah benda uji yang menjadi objek dalam penelitian ini.

**Tabel 3. Jumlah Benda Uji Beton**

| No | Pengujian | Benda Uji Mortar Geopolimer | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100% *Fly ash* | | | 85% *Fly ash* dan 15% PPC | | |
| | | Suhu Tinggi | Suhu Ruangan | Suhu Lapangan | Suhu Tinggi | Suhu Ruangan | Suhu Lapangan |
| 1 | Kuat Tekan 7 Hari | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

| No | Pengujian | Benda Uji Mortar Geopolimer | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 100% *Fly ash* | | | 85% *Fly ash* dan 15% PPC | | |
| | | Suhu Tinggi | Suhu Ruangan | Suhu Lapangan | Suhu Tinggi | Suhu Ruangan | Suhu Lapangan |
| 2 | Kuat Tekan 14 Hari | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 3 | Kuat Tekan 28 Hari | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 4 | Porositas | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 5 | Absorpsi | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Total Benda Uji | | 45 | | | 45 | | |

**5. Pembuatan Benda Uji**

Pembuatan benda uji mortar dilakukan menggunakan bahan yang telah dilakukan beberapa pengujian sesuai ketentuan dan persyaratan yang berlaku.

**a. Mix Design Mortar Geopolimer**

*Mix design* mortar geopolimer yang akan dilakukan pada penelitian ini dibuat terdiri 2 variasi yaitu dengan perbandingan *fly ash* dan *Portland Pozzolan Cemen*. *Mix design* mortar geopolimer pada penelitian ini sama dengan *mix design* mortar konvensional. Akan tetapi yang membedakan keduanya adalah pada material semen yang disubstitusi dengan 100% *fly ash dan 0% Portland Pozzolan Cemen* atau 85% *fly ash dan 15% Portland Pozzolan Cemen*, serta air yang disubstitusi dengan alkali aktivator (NaOH 8M). *Mix design* mortar geopolimer pada penelitian ini direncanakan dengan campuran 1 : 3 dengan faktor air binder sebesar 0,5. Komposisi mortar geopolimer ditunjukkan pada Tabel 3.2.

**Tabel 4. *Mix Design* Beton Geopolimer 100% *Fly ash* untuk 45 Benda Uji**

| *Fly ash* (gr) | Pasir (gr) | NaOH (gr) | Air (ml) |
|---|---|---|---|
| **2800** | **8400** | **448** | **1400** |

**b. Pembuatan Larutan Alkali**

Aktivator merupakan unsur yang mengakibatkan reaksi antara unsur lain. Aktivator yang digunakan pada pembuatan mortar geopolimer umumnya adalah unsur alkali yang terhidrasi. Pada penelitian ini, aktivator yang digunakan adalah Sodium Hidroksida (NaOH) atau disebut juga soda api. NaOH murni memiliki berbentuk putih padat dan tersedia dalam bentuk pelet, serpihan, butiran ataupun larutan jenuh 50% yang biasa disebut larutan sorensen. Sifat dari NaOH murni yaitu mudah larut dalam air dan melepaskan panas ketika proses pelarutan. NaOH yang digunakan pada penelitian ini memiliki molaritas 8M yang berbentuk kepingan putih padat. Berikut perhitungan dari banyaknya kebutuhan NaOH dengan molalitas 8M yang akan digunakan pada penelitian ini

Larutan NaOH 8M
M = 8 Molar
Air = 1400 ml
Mr NaOH = 40 gr/mol (Jumlah dari Ar, Na = 23, O = 16, dan H = 1)

$$M = \frac{\text{Massa NaOH}}{\text{Mr}} \text{ X } \frac{1000}{\text{v Air}}$$

$$8 = \frac{\text{Massa NaOH}}{40} \text{ X } \frac{1000}{1400}$$

Massa NaOH = 448 gram
Keterangan :
M = Kemolaran
V = Volume
Mr = Molekul relatif (total massa atom penyusun molekulnya)

**c. Mortar Geopolimer dengan Penambahan *Portland Pozzolan Cemen* 15%**

Material penyusun untuk mortar geopolimer dengan substitusi PPC 15% yang digunakan pada penelitian ini adalah agregat halus berupa pasir, *Portland Pozzolan cemen* (PPC), *fly ash*, alkali aktivator yaitu NaOH 8M, dan air. Mortar dibuat dengan perbandingan komposisi material 1 Pca : 3 Ps, dimana Pca adalah binder dan Pcs adalah pasir. Nilai Faktor Air yang digunakan adalah 0,5. Persentase substitusi PPC yang digunakan yaitu 15% berdasarkan data hasil penelitian terdahulu. NaOH digunakan sebagai alkali aktivator. Komposisi mortar geopolimer dengan substitusi PPC 15% dapat dilihat pada Tabel 3.3.

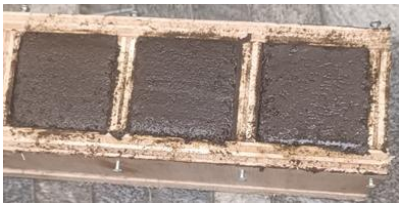
**Tabel 5. Komposisi Mortar dengan Substitusi PPC 15% untuk 45 Benda Uji**

| PPC 15% (gr) | *Fly ash* (gr) | Pasir (gr) | NaOH (gr) | Air (ml) |
|---|---|---|---|---|
| 420 | 2380 | 8400 | 448 | 1400 |

**d. Metode Pembuatan Benda Uji Mortar Geopolimer dengan Penambahan *Portland Pozzolan Cemen 15%***

**Tabel 6. Prosedur Pembuatan Benda Uji Mortar Geopolimer**

| No. | Alat | Gambar |
|---|---|---|
| 1 | Melakukan pencampuran alkali aktivator. Timbang NaOH sesuai dengan berat yang telah ditentukan kemudian larutkan dengan air, aduk hingga NaOH benar-benar larut. Pencampuran NaOH dengan air akan menimbulkan panas, untuk itu tutup wadah yang berisi larutan tersebut untuk menghindari penguapan. Kemudian larutan didiamkan selama 24 jam sebelum dilakukan pencampuran dengan material lainnya |  |
| 2 | *Fly ash* dan semen PPC yang digunakan disaring terlebih dahulu dan lolos pada saringan nomor 200 atau butiran yang berukuran lebih kecil dari 0,075 mm. *Fly ash* yang sudah disaring kemudian dioven pada suhu 100±10°C untuk memastikan kadar airnya 0%.. |   |

| | | |
|---|---|---|
| 3 | Pencampuran material dilakukan secara manual menggunakan cetok dan wadah. Tuangkan material pasir dan *fly ash* dan semen PPC, kemudian campur ketiga material tersebut hingga rata |  |
| 4 | Larutan aktivator yang telah didiamkan selama 24 jam kemudian dicampurkan dengan material pasir dan *fly ash*, lakukan pencampuran larutan aktivator secara bertahap sedikit demi sedikit sampai material tercampur rata. |  |
| 5. | Menyiapkan cetakan mortar dengan mengatur tiap-tiap bagian cetakan agar saling mengunci dan dalam kondisi rapat. Cetakan mortar yang digunakan yaitu bentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm. |  |
| 6. | Melumasi setiap bagian cetakan mortar menggunakan oli. Pelumasan dilakukan menggunakan kuas agar merata. Pelumasan ini dilakukan agar benda uji tidak menepel pada cetakan. |  |
| 7. | Adonan yang telah tercampur rata kemudian dimasukkan ke dalam cetakan yang telah dilumasi dengan oli. Adonan mortar dimasukkan dalam 2 lapisan, tiap lapisannya dilakukan penumbukan sebanyak 32 kali kemudian permukaan atas mortar diratakan menggunakan cetok |  |
| 8. | Setelah 24 jam dibiarkan pada suhu ruangan, kemudian bongkar cetakan mortar. |  |
| 9. | Kemudian dilakukan perawatan suhu tinggi, suhu ruangan, suhu |   |

| | | |
|---|---|---|
| | lapangan untuk mendapatkan kuat tekan yang diinginkan |  |

**Sumber :** Dokumentasi Pribadi

**6. Perawatan Benda Uji**

Perawatan benda uji pada penelitian ini terdapat 3 variasi. Metode perawatan yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

a. Perawatan Dengan Suhu Tinggi

Perawatan benda uji beton geopolimer menggunakan metode dioven pada suhu 60ºC setelah beton berumur 7, 14, dan 28 hari. Pada perawatan beton geopolimer ini, beton dimasukkan oven dengan suhu 60ºC selama 12 jam. Metode ini digunakan karena pada proses polimerisasi pada mortar geopolimer memerlukan suhu tinggi yaitu antara 60ºC sampai 100ºC.

b. Perawatan dengan Suhu Ruangan

Perawatan benda uji beton geopolimer menggunakan metode suhu ruangan setelah beton berumur 7, 14, dan 28 hari. Perawatan mortar ini dilakukan karena mortar geopolimer direncanakan akan dipergunakan sesuai dengan keadaan lapangan yang tidak ada metode oven untuk mencapai kuat tekan yang optimum.

c. Perawatan dengan Suhu Lapangan

Perawatan benda uji beton geopolimer menggunakan metode dijemur dengan panas matahari setelah beton berumur 7, 14, dan 28 hari. Pada perawatan beton geopolimer ini, beton dijemur selama 12 jam untuk mengetahui kuat tekan mortar yang akan diteliti.

**7. Pengujian Kuat Tekan Mortar**

Pengujian kuat tekan mortar bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan mortar geopolimer dalam menahan beban tekan pada umur tertentu. Penelitian ini dilaksanakan menggunakan pendekatan eksperimental dengan dua jenis variasi campuran mortar geopolimer. Variasi pertama adalah mortar geopolimer dengan penambahan *Portland Pozzolan Cement (PPC)* sebesar 15% dan *fly ash* 85%, sedangkan variasi kedua menggunakan *fly ash* 100% tanpa penambahan PPC.

Benda uji yang digunakan pada peneltian ini berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm. untuk setiap variasi mortar membutuhkan benda uji sebanyak 9 buah jadi untuk total pengujian kuat tekan dibutuhkan benda uji sebanyak 54 buah benda uji. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 7 hari, 14 hari, dan 28 hari, dengan jumlah 9 benda uji untuk setiap umur pengujian pada masing-masing variasi mortar**.**



**Gambar 1.** Uji Kuat Tekan Mortar
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

Pengujian dilakukan dengan alat *Compression Test Machine* di Laboratorium Bahan dan Konstruksi Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.



**Gambar 2.** Alat Uji Kuat Tekan Mortar *(Compression Test Machine)*
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

Hasil pengujian kuat tekan kemudian dicatat dan data penelitian dikumpulkan untuk diperiksa dan diolah. Dari data hasil pengujian diharapkan dapat memberikan data-data yang dibutuhkan untuk mencari hubungan antar variabel yang ada. Data yang diperoleh berupa data kuat tekan mortar sesuai dengn komposisi dan metode perawatan yang sudah ditentukan.

**8. Pengujian Porositas Mortar**

Porositas adalah perbandingan volume pori (volume yang dapat ditempati fluida) terhadap volume total mortar. Tujuan dari pengujian ini adalah mengetahui persentase pori-pori mortar terhadap volume mortar. Berikut adalah langkah-langkah pengujian porositas mortar :

a. Menyiapkan benda uji setelah dilakukan metode perawatan selama 14 hari.



**Gambar 3.** Persiapan Benda Uji
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

b. Pastikan benda uji dalam keadaan bersih lalu timbang mortar yang telah dilakukan perawatan.
c. Benda uji kemudian didiamkan pada suhu rungan sampai suhu mortar menjadi normal



**Gambar 4.** Benda Uji setelah didiamkan
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

d. Timbang dan catat benda uji dalam keadaan kering



**Gambar 5.** Penimbangan Benda Uji Keadaan Kering
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

e. Rendam mortar sampai tidak ada gelembung yang keluar dan timbang mortar di dalam air



**Gambar 6.** Perendaman Benda Uji
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

f. Mortar diangkat dan dilap untuk mendapatkan kondisi SSD atau kering permukaan.



**Gambar 7.** Benda Uji Keadaan SSD
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

g. Menimbang massa mortar kondisi SSD.



**Gambar 8.** Penimbangan Benda Uji Keadaan SSD
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

h. Setelah didapatkan massa kering, massa dalam air, dan massa kondisi SSD. Nilai porositas dapat dihitung untuk menentukan nilai porositas mortar yang dibuat.

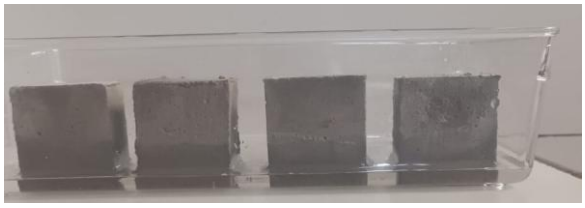
**9. Pengujian Absorpsi Mortar**

a. Siapkan benda uji pada umur 14 hari, pastikan benda uji dalam keadaan bersih.



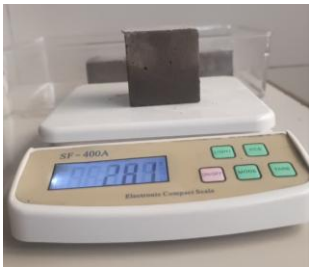
**Gambar 9.** Persiapan Benda Uji
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

b. Benda uji kemudian didiamkan pada suhu ruangan selama 24 jam
c. Menyiapkan wadah untuk tempat uji absorbsi dengan *support* yang disyaratkan dalam ASTM C 1403-05, kemudian diisi air dengan ketinggian 3mm dari permukaan benda uji. Kemudian letakkan benda uji diatas *support*



**Gambar 10.** Perendaman Benda Uji (3 mm)
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

d. Kemudian timbang dan catat massa benda uji pada waktu 0, 0.25, 1, 4, dan 24 jam selama benda uji direndam.



**Gambar 11.** Penimbangan Benda Uji Absorpsi
**Sumber** : Dokumentasi Pribadi

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

### Analisa Hasil Uji Agregat Halus

Pengujian yang harus dilakukan pada agregat halus meliputi uji saringan, kadar lumpur, kadar organik, kadar air, dan berat jenis. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui sifat dan karakteristik agregat halus yang akan digunakan untuk pembuatan benda uji mortar dalam penelitian.

1. Uji Saringan

Pengujian saringan dilakukan dua kali dengan berat sampel 1000 gram per pengujian untuk memastikan konsistensi hasil, menggunakan susunan saringan berukuran 9,5–0,075 mm (9,5; 4,76; 2,36; 1,18; 0,6; 0,3; 0,15; dan 0,075 mm) serta alat sieve shaker.

Hasil analisa uji saringan dapat dilihat pada Tabel 5 dan yang menyatakan pasir bergradasi halus.

**Tabel 7. Analisa Saringan Agregat Halus**
**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| Diameter Saringan | Berat Tertahan | | Rata-rata Tertahan | Persentase Tertahan | Persentase Tertahan Kumulatif | Persentase Lolos | Syarat ASTM C33/C33M |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | | | | | |
| (mm) | (gr) | (gr) | (gr) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| 9,50 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 100 | 100 |
| 4,76 | 41 | 57 | 49 | 4,9 | 4,9 | 95,1 | 90-100 |
| 2,36 | 98 | 82 | 90 | 9 | 13,9 | 86,1 | 75-100 |
| 1,18 | 194 | 210 | 202 | 20,2 | 34,1 | 65,9 | 55-90 |
| 0,60 | 202 | 266 | 234 | 23,4 | 57,5 | 42,5 | 35-59 |
| 0,30 | 241 | 182 | 212,5 | 21,25 | 78,65 | 21,35 | 8-30 |
| 0,15 | 192 | 173 | 182,5 | 12,25 | 96,9 | 3,1 | 0-10 |
| 0,01 | 23 | 25 | 24 | 2,4 | 99,3 | 0,7 | 0 |
| 0,00 | 7 | 5 | 6 | 0,6 | 99,9 | 0,1 | 0 |
| **Total** | **998** | **100** | **999** | **99,9** | | | |

Contoh perhitungan pada table untuk diameter 4,76 mm :

% Tertahan $= \frac{\text{Rata−rata tertahan}}{\text{Berat total}}$ x 100%

$= \frac{49}{999}$ x 100%

= 5%

Tertahan Kumulatif = % tertahan saringan di atasnya + tertahan saringan

= 0 + 5

= 5%

% Lolos = 100% - % tertahan kumulatif

= 100% - 5%

= 95%

Nilai modulus kehalusan pasir dapat dihitung dengan menggunakan rumus dibawah :

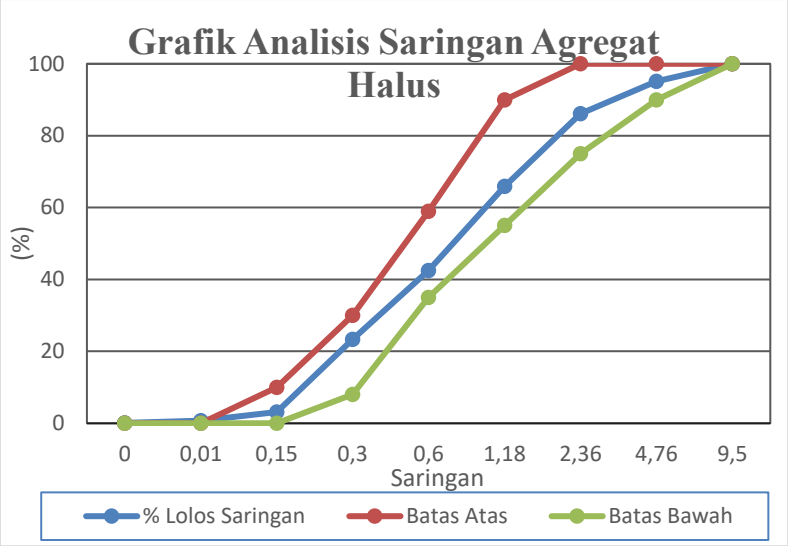
$$FM = \frac{\text{Jumlah tertahan kumulatif di atas saringan 0,15 mm}}{100}$$

$$FM = \frac{0+4,9+13,9+34,1+57,5+78,65+96,9}{100}$$

= 2,859

Nilai FM sebesar 2,859 menunjukkan bahwa pasir bergradasi halus

Pada Tabel 4.1 dapat dilihat hasil analisa uji saringan agregat halus. Untuk gradasi butir agregat disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 12.




**Gambar 12. Grafik Analisa Saringan Agregat Halus**

Gambar 12 menunjukkan grafik analisa saringan agregat halus. Dimana sumbu x menunjukkan ukuran ayakan, sedangkan sumbu y menunjukkan presentase lolos saringan. Garis berwarna biru merupakan hasil uji saringan agregat halus yang digunakan dalam penelitian, garis berwarna merah merupakan syarat batas atas presentase lolos saringan, sedangkan garis berwarna kuning merupakan syarat batas bawah presentase lolos saringan. Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa gradasi butiran agregat halus memenuhi standar ASTM C33/C33M.

2. Uji Kadar Air

Pengujian kadar air agregat halus dilakukan dua kali dengan berat sampel 500 gram per pengujian pada kondisi kering dan SSD, di mana sampel kondisi kering dioven selama 24 jam lalu ditimbang untuk memperoleh massa awal 500 gram sebagai dasar perhitungan kadar air, sedangkan kondisi SSD ditentukan menggunakan alat corong konik yang membentuk agregat menyerupai kerucut dan runtuh sebagian saat corong diangkat.

a. Perhitungan Hasil Pengujian Kadar Air Pasir Kondisi Asli

**Tabel 8. Perhitungan Kadar Air Pasir Kondisi Asli**

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| **Kondisi Asli** | **Sampel 1** | **Sampel 2** |
|---|---|---|
| Massa contoh (a) | 500 gr | 500 gr |
| Massa kering (b) | 488 gr | 488 gr |
| Massa air (c) | 12 | 12 |
| Kadar air ($\frac{c}{a}$ x 100%) | 2,4 | 2,4 |
| Rata – rata kadar air | 2,4 | |

b. Perhitungan Hasil Uji Kadar Air Pasir Kondisi SSD

**Tabel 9. Perhitungan Kadar Air Pasir Kondisi SSD**

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| **Kondisi SSD** | **Sampel 1** | **Sampel 2** |
|---|---|---|
| Massa contoh (a) | 500 gr | 500 gr |
| Massa kering (b) | 485 | 486 |
| Massa air (c) | 15 | 14 |
| Kadar air ($\frac{c}{a}$ x 100%) | 3 | 2,8 |
| Rata – rata kadar air | 2,9 | |

Tabel 8 & 9 menunjukkan perhitungan rata-rata pada kedua pengujian pasir pada kondisi asli dan kondisi SSD. Berdasarkan hasil uji kadar air agregat halus diperoleh kandungan nilai

kadar air asli sebesar 2,4 dan nilai kadar air dalam kondisi SSD sebesar 2,9 yang menunjukkan bahwa pasir pada kondisi asli dan SSD memenuhi syarat SNI 03-6819-2002 yang mana nilai kadar air < 3%.

3. Uji Kandungan Organik

Pengujian kandungan organik agregat halus dilakukan dengan metode kocokan, yaitu memasukkan pasir kering ke dalam erlenmeyer 250 cc hingga setinggi 130 cc, menambahkan larutan NaOH 3% hingga meresap setinggi 200 cc, menutup mulut erlenmeyer dengan plastik, mengocok selama ±30 menit, lalu mendiamkannya selama 24 jam sebelum warna hasil pengujian diamati dan dicatat menggunakan tintometer, dengan hasil pengamatan sebelum dan sesudah pencucian disajikan pada Tabel 7.

**Tabel 10. Hasil Pengujian Kandungan Organik**

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| Jenis pengujian | ebelum pencucian | Sesudah pencucian |
|---|---|---|
| Kotoran organik warna NaOH | uning Kecoklatan | Bening |

Berdasarkan pengujian kandungan organik pada agregat halus, diperoleh skala warna tintometer untuk 11 sebelum pencucian dan untuk 5 setelah pencucian. Sehingga agregat halus sesudah pencucian kandungan organik memenuhi SNI 03-2816-2014 yang mana syaratnya berwarna bening (5).

4. Uji Kadar Lumpur

Pengujian kadar lanau bertujuan mengetahui proporsi lanau dalam agregat halus, baik sebelum maupun sesudah pencucian. Perhitungan hasil pengujian kadar lumpur agregat dalam kondisi asli dan sesudah dicuci dapat ditunjukkan pada table 10.

**Tabel 10 Hasil Pengujian Kandungan Lumpur**

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| **Sebelum Pencucian** | | **Sesudah Pencucian** | |
|---|---|---|---|
| Tinggi lumpur (a) | 15 | Tinggi lumpur (a) | 5 |
| Tinggi pasir (b) | 110 | Tinggi pasir (b) | 125 |
| Tinggi total (c) | 125 | Tinggi total (c) | 130 |
| Kadar lumpur ( $\frac{c}{a}$ x 100%) | 12% | Kadar lumpur ( $\frac{c}{a}$ x 100%) | 3,84% |

Berdasarkan tabel perhitungan kandungan lumpur sebelum dicuci dan sesudah dicuci yang mana untuk kadar lumpur sebelum dicuci sebesar 12% dan sesudah dicuci sebesar 3,84%, maka agregat yang sesuai dengan syarat SNI 03-6820-2002 yang mana < 5% adalah dilakukan pencucian.

5. Uji Berat Jenis

Pengujian berat jenis dilakukan untuk mengetahui nilai berat jenis pasir dalam kondisi asli dan SSD. Hasil perhitungan uji berat jenis pasir dalam kondisi asli dan SSD ditunjukkan pada Tabel 11 & 12.

a. Perhitungan Berat Jenis Kondisi Asli

**Tabel 11 Perhitungan Berat Jenis Kondisi Asli**

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| **Kondisi Asli** | **Sampel 1** | **Sampel 2** |
|---|---|---|
| Berat pasir (a) | 500 | 500 |
| Berat air + tabung (b) | 673 | 673 |
| Berat air + tabung + pasir (c) | 979 | 983 |
| Berat jenis ( $\frac{a}{a+b-c}$ ) | 2,538 | 2,631 |
| Rata-rata | 2,586 | |

b. Perhitungan Berat Jenis Kondisi SSD

**Tabel 12. Perhitungan Berat Jenis Kondisi SSD**

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| Kondisi SSD | Sampel 1 | Sampel 2 |
|---|---|---|
| Berat pasir (a) | 500 | 500 |
| Berat air + tabung (b) | 673 | 673 |
| Berat air + tabung + pasir (c) | 976 | 975 |
| Berat jenis ( $\frac{a}{a+b-c}$ ) | 2,538 | 2,525 |
| Rata-rata | 2,531 | |

Berdasarkan tabel perhitungan berat jenis pada kondisi asli dan SSD menunjukan bahwa keduanya memenuhi SNI 03-6819-2002 yaitu > 2,5.

Berikut adalah rekapitulasi hasil pengujian agregat halus yang sudah dilakukan pengujian yang mana nantinya akan digunakan pada penelitian. Rekapitulasi hasil pengujian agregat halus ditunjukkan pada Tabel 12.

**Tabel 12 Rekapitulasi Hasil Pengujian Agregat Halus**

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| No | Pengujian | Hasil uji | Spesifikasi | Memenuhi / Tidak |
|---|---|---|---|---|
| 1. | Analisa saringan Modulus kehalusan | 2,859 | STM C33/ C33M – Pasal 6.2 2,3 – 3,1 | Memenuhi |
| 2. | Analisa kadar air - Kondisi asli - Kondisi SSD | 2,4 2,9 | NI 03-6819-2002 pasal 2.2 ayat 1 <3% | Memenuhi |
| 3. | Kadar lumpur - Sebelum dicuci - Sesudah dicuci | **12** 3,84 | NI 03-6820-2002 < 5% | Memenuhi |
| 4. | Kandungan organik Warna NaOH - Sebelum dicuci - Sesudah dicuci | -Kuning kecoklatan -Bening | NI 03-2816-2014 No 5 (Bening) – No 8 (Kuning) | Memenuhi |
| 5. | Berat Jenis - Kondisi asli - Kondisi SSD | 2,586 2,531 | NI 03-6819-2002 pasal 2.2 > 2,5 | Memenuhi |

**Analisis Hasil Pengujian *Fly ash***

Pengujian yang dilakukan pada *fly ash* yaitu pengujian analisis saringan dan pengujian kadar air yang terkandung dalam *fly ash*. Tujuan dilakukannya pengujian bahan material berupa *fly ash* adalah untuk mengetahui karakteristik *fly ash* yang akan digunakan untuk pembuatan benda uji.

1. Pengujian Jenis *Fly ash*

Analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) yang dilakukan dalam pengujian ini di laboratorium Universitas Diponegoro mengonfirmasi bahwa abu terbang yang digunakan termasuk dalam Kelas F. Hasil uji jenis *fly ash* dengan metode XRF dapat dilihat pada Tabel 13.

**Tabel 13. Hasil Pengujian XRF *Fly ash* PLTU Tanjung Jati**
**Sumber** : Data Hasil Penelitian

| No | Komponen | Hasil | Satuan |
|---|---|---|---|
| 1 | Na2O | 2.57 | % |
| 2 | MgO | 2.34 | % |
| 3 | Al2O3 | 17.3 | % |
| 4 | SiO2 | 42.5 | % |
| 5 | P2O5 | 0.204 | % |
| 6 | SO3 | 0.880 | % |
| 7 | K2O | 1.61 | % |
| 8 | CaO | 8.30 | % |
| 9 | TiO2 | 0.875 | % |
| 10 | MnO | 0.156 | % |
| 11 | Fe2O3 | 12.1 | % |
| 12 | NiO | 0.0212 | % |
| 13 | CuO | 0.0183 | % |
| 14 | ZnO | 0.0156 | % |
| 15 | Rb2O | 0.0104 | % |
| 16 | SrO | 0.140 | % |
| 17 | ZrO2 | 0.0262 | % |
| 18 | BaO | 0.203 | % |

Berdasarkan kandungan unsur kimia *fly ash* pada table diatas diperoleh total kandungan SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 sebesar 71,9% dan kadar CaO sebesar 8,3%. Hasil ini menunjukkan bahwa *fly ash* yang digunakan tergolong jenis F yang mana untuk kadar SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 > 70% serta kandungan CaO < 10%.

2. Uji Analisis Saringan

Pengujian analisis saringan digunakan untuk mendapatkan *fly ash* dengan ukuran butir yang seragam dengan melakukan penyaringan nomor 200 atau memiliki ukuran butir kurang dari 0,075 mm dengan tujuan agar mempermudah pencampuran *fly ash* dengan bahan lainnya sebagai bahan pengikat pada pembuatan mortar. Sehingga *fly ash* sebelum dilakukan penyaringan terlebih dahulu dilakukan penumbukan. Setelah dilakukan penumbukan maka dilanjutkan penyaringan ayakan nomor 200. *Fly ash* yang lolos inilah yang akan digunakan sebagai bahan material pembuatan mortar geopolimer.

3. Uji Kadar Air

Pengujian kadar air *fly ash* pada penelitian ini dilakukan sebanyak dua kali percobaan dengan berat 100 gram untuk setiap sampel percobaan. Sebelum dilakukan pengujian terlebih dahulu sampel *fly ash* dilakukan pengovenan selama 24 jam hingga kering dan kemudian ditimbang untuk berat setelah pengovenan.

Hasil penimbangan setelah dilakukan pengovenan (massa kering) akan dihitung untuk mendapatkan nilai kadar air yang terkandung dalam *fly ash*. Hasil analisis uji kadar air pada *fly ash* dapat dilihat pada Tabel 14 berikut.

**Tabel 14. Perhitungan Nilai Kadar Air *Fly ash***

| Komponen | Percobaan 1 | Percobaan 2 |
|---|---|---|
| Massa contoh (a) | 100 gram | 100 gram |
| Massa kering (b) | 100 gram | 100 gram |
| Massa air (c) | 0 gram | 0 gram |
| Kadar air ( $\frac{c}{a}$ x 100%) | 0% | 0% |
| Rata – rata kadar air | 0% | |

Berdasarkan pengujian kadar air *fly ash*, diperoleh nilai rata-rata kadar air *fly ash* 0% sehingga *fly ash* berada dalam kondisi kering sehingga tidak mempengaruhi proses pengikatan dan penambahan jumlah aktivator yang diperlukan.

**Analisis Hasil Uji Material *Semen Portland Pozzolan Cemen (PPC)***

Semen pada penelitian ini dilakukan pengujian analisis saringan. Dilakukannya pengujian analisis saringan yaitu untuk mengetahui karakteristik semen yang digunakan agar memiliki ukuran butiran yang seragam untuk mempermudah dalam proses pembuatan mortar. Penggunaan semen PPC pada penelitian ini dilakukan sebagai bahan tambahan pada pembuatan mortar geopolimer.

1. Uji Analisis Saringan

Analisis saringan dilakukan pada pengujian semen untuk mendapatkan ukuran butiran lolos saringan nomor 200 atau memiliki ukuran butiran kurang dari 0,075 mm yang memiliki tujuan untuk memiliki kesamaan ukuran antara sifat fisik semen, agregat halus dan *fly ash* yang mana nantinya dapat saling mengikat dengan baik. Maka penyaringan sebelum dilakukan pembuatan mortar semen PPc terlebih dahulu dilakukan penyaringan. Semen PPC dalam kondisi asli memiliki ukuran butiran yang seragam dan relatif halus maka dipastikan hamper semua material semen PPC dapat digunakan pada pembuatan benda uji untuk dilakukan dalam penelitian ini.

**Hasil Uji Porositas Mortar**

Pada pengujian porositas mortar diperoleh hasil berupa massa yang ditimbang. Penimbangan pada setiap variasi benda uji dilakukan sebanyak 3 kali yaitu dalam kondisi kering (A), dalam air (B), dan kondisi SSD (C). Selanjutnya hasil pengujian porositas mortar kemudian dilakukan perhitungan presentase pori-pori yang dimiliki kedua variasi benda uji untuk mengetahui dampak perawatan serta komposisi terhadap porositas mortar. Hasil pengujian porositas mortar ditunjukkan pada Tabel 15 & 16.

**Tabel 15. Hasil Uji Porositas Mortar Geopolimer 100% *Fly ash***

**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| **Variasi Mortar** | | **Mortar Geopolimer 100% *fly ash*** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | **Suhu Tinggi** | | | **Suhu Ruangan** | | | **Suhu Lapangan** | | |
| | | **I** | **II** | **III** | **I** | **II** | **III** | **I** | **II** | **III** |
| Gram | Kering (A) | 272 | 273 | 271 | 282 | 282 | 282 | 281 | 277 | 280 |
| | Dalam Air (B) | 156 | 156 | 154 | 159 | 158 | 158 | 160 | 156 | 159 |
| | SSD (C) | 292 | 292 | 290 | 292 | 291 | 291 | 296 | 292 | 295 |
| Gram | D = (C-A) | 20 | 19 | 19 | 10 | 9 | 9 | 15 | 15 | 15 |
| Gram | E = (C-B) | 136 | 136 | 136 | 133 | 133 | 133 | 136 | 136 | 136 |

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| % | Porositas = ((D/E) x 100) | 4,70 | 13,97 | 13,97 | 7,51 | 6,76 | 6,76 | 11,02 | 11,02 | 11,02 |
| % | Rata-rata Porositas | 14,21 | | | 7,01 | | | 11,02 | | |

**Tabel 16. Hasil Uji Porositas Mortar Geopolimer Subtitusi Semen PPC 15%**
**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| Variasi Mortar | | Mortar Geopolimer Subtitusi Semen PPC 15% | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Suhu Tinggi | | | Suhu Ruangan | | | Suhu Lapangan | | |
| | | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Gram | Kering (A) | 269 | 271 | 279 | 302 | 301 | 294 | 295 | 284 | 288 |
| | Dalam Air (B) | 157 | 161 | 165 | 168 | 169 | 164 | 169 | 163 | 165 |
| | SSD (C) | 290 | 294 | 299 | 312 | 308 | 302 | 310 | 297 | 302 |
| Gram | D = (C-A) | 21 | 23 | 20 | 10 | 7 | 8 | 15 | 13 | 14 |
| Gram | E = (C-B) | 133 | 133 | 134 | 144 | 139 | 148 | 141 | 134 | 137 |
| % | Porositas = ((D/E) x 100) | 15,78 | 17,29 | 14,92 | 6,94 | 5,03 | 5,40 | 10,63 | 9,70 | 10,21 |
| % | Rata-rata Porositas | 15,99 | | | 5,79 | | | 10,18 | | |

Hasil pengujian porositas menunjukkan bahwa Porositas mortar 100% fly ash lebih kecil dibanding substitusi PPC 15% pada suhu tinggi, tetapi lebih besar pada suhu ruangan dan lapangan, dengan rata-rata porositas mortar fly ash sebesar 14,21% (suhu tinggi), 7,01% (suhu ruangan), 11,02% (suhu lapangan), sedangkan mortar PPC 15% sebesar 15,99%, 5,79%, dan 10,18%; porositas tertinggi (suhu tinggi) disebabkan kehilangan air cepat yang menimbulkan rongga, sedangkan porositas terendah (suhu ruangan) akibat pengeringan lebih lama, dan substitusi PPC 15% cenderung lebih padat namun lebih sulit mengisi celah karena mengering lebih cepat.

**Hasil Uji Absorpsi Mortar**

Massa benda uji mortar yang sudah diukur untuk menentukan nilai absorbsi mortar kemudian dilakukan pencatatan dalam sajian tabel hasil uji absorpsi untuk mortar geopolimer dan mortar geopolimer subtitusi semen PPC 15% dengan aktivator NaOH dengan variasi metode perawatan suhu tinggi, suhu ruangan, dan suhu lapangan. Hasil pengukuran massa pada uji absorbsi mortar dapat dilihat pada Tabel 17 & 18.

**Tabel 17. Hasil Uji Absorbsi Mortar Geopolimer 100% *Fly ash***
**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| Variasi Mortar Geopolimer | | Mortar Geopolimer 100 % *Fly ash* | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Suhu Tinggi | | | Suhu Ruangan | | | Suhu Lapangan | | |
| | | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Massa Sebelum Pengujian (Wo) Gram | | 268 | 275 | 275 | 283 | 281 | 278 | 273 | 273 | 279 |
| Massa Pengujian | 0 Jam | 268 | 275 | 275 | 283 | 281 | 278 | 273 | 273 | 279 |
| | 0,25 | 288 | 295 | 294 | 292 | 290 | 288 | 287 | 287 | 293 |

| Variasi Mortar Geopolimer | | Mortar Geopolimer 100 % *Fly ash* | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Suhu Tinggi | | | Suhu Ruangan | | | Suhu Lapangan | | |
| | | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| ($W_t$) Gram | Jam | | | | | | | | | |
| | Jam | 289 | 296 | 296 | 293 | 291 | 288 | 289 | 289 | 295 |
| | Jam | 289 | 296 | 296 | 293 | 291 | 288 | 289 | 289 | 295 |
| | 4 Jam | 290 | 296 | 296 | 293 | 291 | 288 | 289 | 290 | 295 |
| Absorbsi (%) = (($W_t$ - Wo) / Wo x 100 | Jam | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0,25 Jam | 7,46 | 7,27 | 7,27 | 3,18 | 3,20 | 3,59 | 4,98 | 5,12 | 5,01 |
| | Jam | 7,83 | 7,63 | 6,90 | 3,53 | 3,55 | 3,59 | 5,69 | 5,86 | 5,73 |
| | Jam | 7,83 | 7,63 | 7,63 | 3,53 | 3,55 | 3,59 | 5,69 | 5,86 | 5,73 |
| | 4 Jam | 8,2 | 7,63 | 7,63 | 3,53 | 3,55 | 3,59 | 5,69 | 6,22 | 5,73 |
| Rata-rata Absorbsi (%) | Jam | 0 | | | 0 | | | 0 | | |
| | 0,25 Jam | 7,33 | | | 3,32 | | | 4,03 | | |
| | Jam | 7,45 | | | 3,55 | | | 5,76 | | |
| | Jam | 7,69 | | | 3,55 | | | 5,76 | | |
| | 4 Jam | 7,82 | | | 3,55 | | | 5,88 | | |

**Tabel 18. Hasil Uji Absorbsi Mortar Geopolimer Subtitusi Semen PPC 15%**
**Sumber :** Data Hasil Penelitian

| Variasi Mortar Geopolimer | | Mortar Geopolimer 100 % *Fly ash* | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Suhu Tinggi | | | Suhu Ruangan | | | Suhu Lapangan | | |
| | | I | II | III | I | II | III | I | II | III |
| Massa Sebelum Pengujian (Wo) Gram | | 283 | 274 | 265 | 287 | 293 | 293 | 281 | 281 | 281 |
| | 0 Jam | 283 | 274 | 265 | 287 | 293 | 293 | 281 | 281 | 281 |
| | 0,25 Jam | 306 | 295 | 285 | 295 | 302 | 300 | 293 | 293 | 293 |
| Massa Pengujian ($W_t$) Gram | 1 Jam | 307 | 296 | 287 | 297 | 303 | 301 | 296 | 296 | 296 |
| | 4 Jam | 308 | 298 | 287 | 297 | 303 | 301 | 296 | 296 | 296 |
| | 24 Jam | 308 | 298 | 288 | 297 | 303 | 301 | 296 | 296 | 296 |
| bsorbsi (%) = (($W_t$ - Wo) / Wo x 100 | 0 Jam | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 0,25 Jam | 9,09 | 7,66 | 7,54 | 2,78 | 3,07 | 2,38 | 4,27 | 4,27 | 4,27 |
| | 1 Jam | 9,48 | 8,02 | 8,3 | 3,48 | 3,41 | 2,73 | 5,33 | 5,33 | 5,33 |
| | 4 Jam | 9,88 | 8,75 | 8,3 | 3,48 | 3,41 | 2,73 | 5,33 | 5,33 | 5,33 |
| | 24 Jam | 9,88 | 8,75 | 8,67 | 3,48 | 3,41 | 2,73 | 5,33 | 5,33 | 5,33 |
| Rata-rata Absorbsi (%) | 0 Jam | 0 | | | 0 | | | 0 | | |
| | 0,25 Jam | 8,09 | | | 2,74 | | | 4,27 | | |
| | 1 Jam | 8,6 | | | 3,2 | | | 5,33 | | |
| | 4 Jam | 8,97 | | | 3,2 | | | 5,33 | | |
| | 24 Jam | 9,1 | | | 3,2 | | | 5,33 | | |

Hasil pengujian absorpsi menunjukkan bahwa Mortar substitusi PPC 15% memiliki absorpsi lebih kecil pada suhu ruangan dan lapangan, namun lebih besar pada suhu tinggi dibanding mortar 100% fly ash, dengan massa naik cepat pada 0–0,25 jam lalu stabil hingga

24 jam; nilai absorpsi tertinggi pada substitusi PPC 15% suhu tinggi (94,66 gram/cm²) dan terendah pada suhu ruangan (8 gram/cm²). Absorpsi tinggi pada suhu tinggi berisiko meningkatkan penyerapan zat perusak beton dan menurunkan mutu mortar, sedangkan pada suhu ruangan dan lapangan absorpsi lebih rendah karena kehilangan air yang lebih sedikit selama perawatan.

**Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar**

Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer dan mortar geopolimer subtitusi semen PPC 15% sesuai metode serta umur perawatan yang telah direncanakan dicatat dan disajikan dalam tabel.

1. Kuat Tekan Mortar Suhu Tinggi (60 ºC)

Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer setelah proses perawatan suhu tinggi ditunjukkan pada Tabel 19.

**Tabel 19. Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer Perawatan Suhu Tinggi (1 MPa = 10,1972 kg/cm2)**

| Umur | Variasi Mortar | | Massa (gram) | Gaya (N) | Luas Penampang (mm²) | Kuat Tekan (MPa) | Rata-rata Kuat Tekan (kg/cm²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 Hari | 00% *Fly ash* | I | 276 | 16931 | 2500 | 6,77 | 6,55 | 66,82 |
| | | II | 288 | 17829 | 2500 | 7,13 | | |
| | | II | 288 | 14424 | 2500 | 5,76 | | |
| 7 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 292 | 24403 | 2500 | 9,76 | 8,86 | 90,34 |
| | | II | 293 | 23977 | 2500 | 9,59 | | |
| | | II | 277 | 18113 | 2500 | 7,24 | | |
| 14 Hari | 00% *Fly ash* | I | 271 | 58296 | 2500 | 23,57 | 24,53 | 250,13 |
| | | II | 264 | 60676 | 2500 | 24,27 | | |
| | | II | 273 | 64412 | 2500 | 25,76 | | |
| 14 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 271 | 69094 | 2500 | 27,63 | 27,00 | 275,32 |
| | | II | 284 | 59589 | 2500 | 23,83 | | |
| | | II | 283 | 73918 | 2500 | 29,56 | | |
| 28 Hari | 00% *Fly ash* | I | 274 | 66446 | 2500 | 26,57 | 7,21 | 277,46 |
| | | II | 270 | 68394 | 2500 | 27,35 | | |
| | | II | 278 | 69293 | 2500 | 27,71 | | |
| 28 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 266 | 75225 | 2500 | 30,09 | 29,96 | 305,50 |
| | | II | 270 | 72321 | 2500 | 28,92 | | |
| | | II | 278 | 77177 | 2500 | 30,87 | | |

Menurut Tabel 19, kuat tekan rata-rata mortar geopolimer pada perawatan suhu tinggi meningkat konsisten seiring umur, yaitu untuk mortar 100% fly ash sebesar 6,55 MPa (7 hari), 24,53 MPa (14 hari), dan 27,21 MPa (28 hari), sedangkan mortar substitusi PPC 15% sebesar 8,86 MPa, 27,00 MPa, dan 29,96 MPa pada umur yang sama, dengan nilai tertinggi dicapai oleh mortar substitusi PPC 15% pada hari ke-28; hasil ini menunjukkan tidak ada penurunan kuat tekan pada perawatan suhu 60°C, melainkan peningkatan yang stabil seiring bertambahnya umur perawatan.

2. Kuat Tekan Mortar Suhu Ruangan

Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer 100% *fly ash* dan mortar geopolimer dengan subtitusi semen PPC 15% perawatan suhu ruangan ditunjukkan pada Tabel 20.

**Tabel 20. Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer Perawatan Suhu Ruangan (1 MPa = 10,1972 kg/cm2)**

| Umur | Variasi Mortar | | Massa (Gram) | Gaya (N) | Luas Penampang (mm²) | Kuat Tekan (MPa) | Rata-rata Kuat Tekan (kg/cm²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 Hari | 00% *Fly ash* | I | 292 | 3640 | 2500 | 1,46 | 1,34 | 13,66 |
| | | II | 290 | 2510 | 2500 | 1,00 | | |
| | | III | 297 | 3970 | 2500 | 1,58 | | |
| 7 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 295 | 2180 | 2500 | 0,87 | 0,83 | 8,46 |
| | | II | 296 | 1890 | 2500 | 0,75 | | |
| | | III | 306 | 2180 | 2500 | 0,87 | | |
| 4 Hari | 00% *Fly ash* | I | 276 | 10830 | 2500 | 4,33 | 4,65 | 47,41 |
| | | II | 297 | 11681 | 2500 | 4,67 | | |
| | | III | 285 | 12391 | 2500 | 4,95 | | |
| 4 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 293 | 15796 | 2500 | 6,31 | 4,53 | 46,19 |
| | | II | 291 | 9600 | 2500 | 3,84 | | |
| | | III | 289 | 8655 | 2500 | 3,46 | | |
| 28 Hari | 00% *Fly ash* | I | 281 | 25680 | 2500 | 10,27 | 9,56 | 97,48 |
| | | II | 289 | 16742 | 2500 | 6,69 | | |
| | | III | 289 | 29369 | 2500 | 11,74 | | |
| 28 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 299 | 21329 | 2500 | 8,53 | 11,12 | 113,39 |
| | | II | 293 | 38827 | 2500 | 15,53 | | |
| | | III | 300 | 23315 | 2500 | 9,32 | | |

Menurut Tabel 20, kuat tekan rata-rata mortar geopolimer pada perawatan suhu ruangan meningkat seiring umur, yaitu untuk mortar 100% fly ash sebesar 1,34 MPa (7 hari), 4,65 MPa (14 hari), dan 9,56 MPa (28 hari), sedangkan mortar substitusi PPC 15% sebesar 0,83 MPa, 4,53 MPa, dan 11,12 MPa pada umur yang sama, dengan nilai tertinggi dicapai mortar 100% fly ash pada hari ke-28; hasil ini menunjukkan tidak ada penurunan kuat tekan pada perawatan suhu ruangan, melainkan peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya umur perawatan.

3. Kuat Tekan Mortar Suhu Lapangan

Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer 100% *fly ash* dan mortar geopolimer dengan subtitusi semen PPC 15% perawatan suhu ruangan ditunjukkan pada Tabel 21.

**Tabel 21. Hasil Kuat Tekan Mortar Geopolimer Perawatan Suhu Lapangan (1 MPa = 10,1972 kg/cm2)**

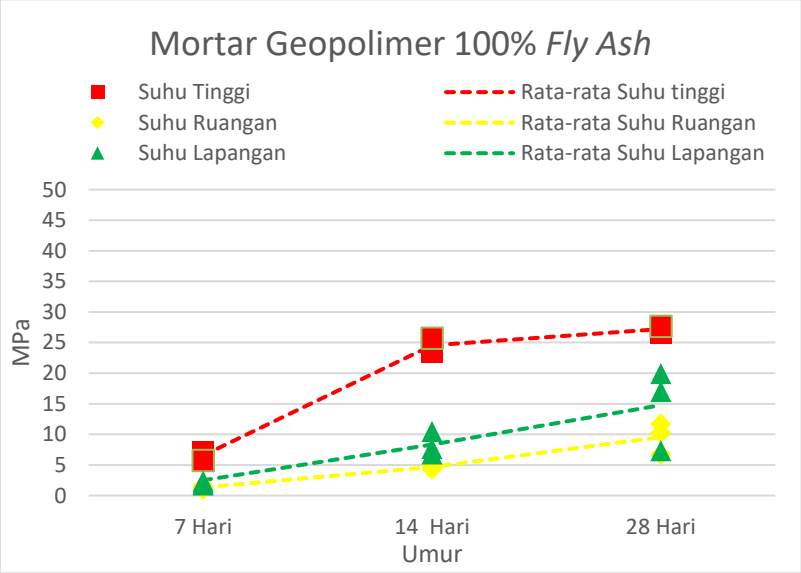
| Umur | Variasi Mortar | | Massa (Gram) | Gaya (N) | Luas Penampang (mm²) | Kuat Tekan (MPa) | Rata-rata Kuat Tekan (kg/cm²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 Hari | 100% *Fly ash* | I | 291 | 4310 | 2500 | 1,74 | 2,05 | 20,90 |
| | | II | 291 | 5155 | 2500 | 2,06 | | |
| | | III | 286 | 5912 | 2500 | 2,36 | | |
| 7 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 299 | 3070 | 2500 | 1,22 | 1,32 | 13,46 |
| | | II | 284 | 4350 | 2500 | 1,74 | | |
| | | III | 296 | 2510 | 2500 | 1,00 | | |
| 4 Hari | 100% *Fly ash* | I | 275 | 19295 | 2500 | 7,71 | 8,33 | 84,94 |
| | | II | 280 | 17073 | 2500 | 6,82 | | |
| | | III | 277 | 26200 | 2500 | 10,48 | | |
| 4 Hari | 85% *Fly ash* 15% | I | 291 | 24734 | 2500 | 9,89 | 10,5 | 107,07 |
| | | II | 295 | 24308 | 2500 | 9,72 | | |

| Umur | Variasi Mortar | | Massa (Gram) | Gaya (N) | Luas Penampang (mm²) | Kuat Tekan (MPa) | Rata-rata Kuat Tekan (kg/cm²) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | PPC | III | 289 | 29747 | 2500 | 11,89 | | |
| 28 Hari | 100% *Fly ash* | I | 268 | 42611 | 2500 | 17,04 | 14,77 | 150,61 |
| | | II | 280 | 49846 | 2500 | 19,93 | | |
| | | III | 273 | 18397 | 2500 | 7,35 | | |
| 28 Hari | 85% *Fly ash* 15% PPC | I | 287 | 31639 | 2500 | 12,65 | 15,47 | 157,75 |
| | | II | 283 | 48900 | 2500 | 19,56 | | |
| | | III | 289 | 35564 | 2500 | 14,22 | | |

Menurut Tabel 21, kuat tekan rata-rata mortar geopolimer pada perawatan suhu lapangan meningkat seiring umur, yaitu untuk mortar 100% fly ash sebesar 2,05 MPa (7 hari), 8,33 MPa (14 hari), dan 14,77 MPa (28 hari), sedangkan mortar substitusi PPC 15% sebesar 1,32 MPa, 10,5 MPa, dan 15,47 MPa pada umur yang sama, dengan nilai tertinggi dicapai mortar substitusi PPC 15% pada hari ke-28; hasil ini menunjukkan tidak ada penurunan kuat tekan pada perawatan suhu lapangan, melainkan peningkatan yang konsisten seiring bertambahnya umur perawatan.

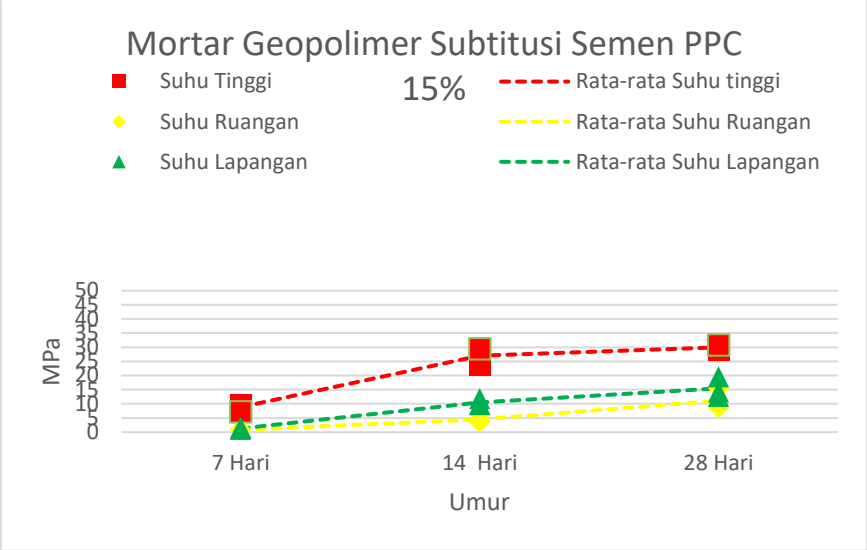
**Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer 100% *Fly ash* dan Mortar Geopolimer Subtitusi Semen PPC 15%**

Pada pengujian ini perbandingan hasil kuat tekan mortar geopolimer kedua variasi serta metode perawatan selama 28 hari. Tujuan dari perbandingan ini untuk mengetahui perbedaan kuat tekan mortar dari kedua variasi baik metode perawatan suhu tinggi, suhu ruangan, dan suhu lapangan. Untuk membandingkan hasil kuat tekan untuk semua variasi mortar (*fly ash* 100% dan subtitusi semen PPC 15%) dapat dilihat dalam gambar 4.17 dan gambar 4.18.



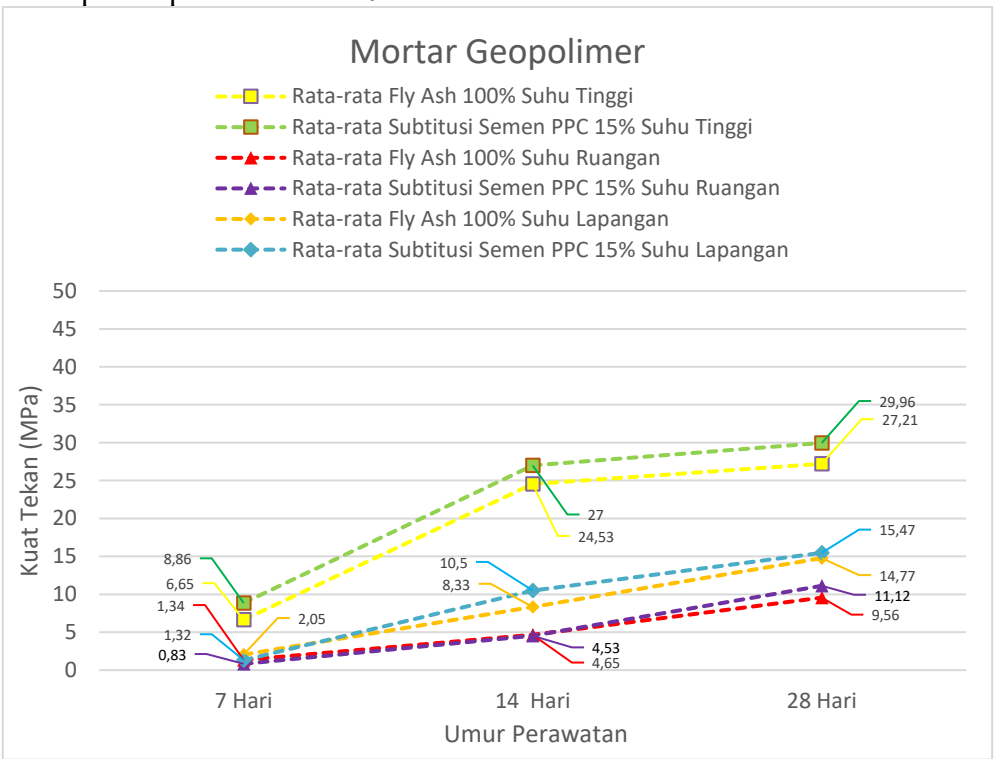

**Gambar 13. Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer 100% *Fly ash***

Berdasarkan grafik, mortar geopolimer 100% fly ash dengan perawatan suhu tinggi menghasilkan kuat tekan tertinggi di setiap umur (7, 14, 28 hari) dibanding perawatan suhu ruangan dan lapangan, dengan rentang kuat tekan 5,76–27,71 MPa (suhu tinggi), 1,74–19,93 MPa (suhu lapangan), dan 1,00–11,74 MPa (suhu ruangan, terendah); peningkatan kuat tekan pada suhu tinggi berlangsung signifikan, sedangkan pada suhu ruangan dan lapangan peningkatannya lebih landai, menegaskan bahwa metode perawatan sangat berpengaruh terhadap kuat tekan mortar geopolimer.




**Gambar 14. Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Subtitusi Semen PPC 15%**

Mortar substitusi PPC 15% dengan perawatan suhu tinggi menghasilkan kuat tekan tertinggi di setiap umur (7,24–30,87 MPa), diikuti suhu lapangan (1,00–19,56 MPa) dan suhu ruangan yang terendah (0,75–15,53 MPa), dengan peningkatan paling signifikan terjadi pada suhu tinggi dibanding dua metode lainnya yang lebih landai, menegaskan besarnya pengaruh metode perawatan terhadap kuat tekan mortar geopolimer, sebagaimana perbandingan kedua variasi mortar ditampilkan pada Gambar 20.




**Gambar 20. Perbandingan Kuat Tekan Mortar Geopolimer 100% *Fly ash* dan Subtitusi Semen PPC 15% Perawatan Suhu Tinggi**

Mortar substitusi PPC 15% unggul pada suhu tinggi (umur 7 dan 14 hari) serta lapangan (umur 14 hari), namun kalah pada suhu ruangan dan lapangan di umur 7 hari; secara umum substitusi PPC 15% menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibanding 100% fly ash, dengan kuat tekan pada suhu tinggi melonjak signifikan di awal lalu melandai di umur 28 hari karena reaksi polimerisasi antara alkali aktivator dan unsur Si-Al fly ash berlangsung lebih cepat akibat suhu tinggi, sehingga kuat tekan sudah mendekati nilai optimalnya (Wardhono dkk., 2019).

**Hubungan Kuat Tekan dan Porositas**

Hasil pengujian porositas mortar akan dibandingkan dengan kuat tekan mortar geopolimer kedua variasi dan metode perawatan. Tujuan dilakukannya perbandingan adalah untuk mengetahui hubungan antara porositas dengan kuat tekan pada varisi mortar geopolimer dan metode perawatannya. Data hasil pengujian porositas dan kuat tekan ditunjukkan pada Tabel 22.

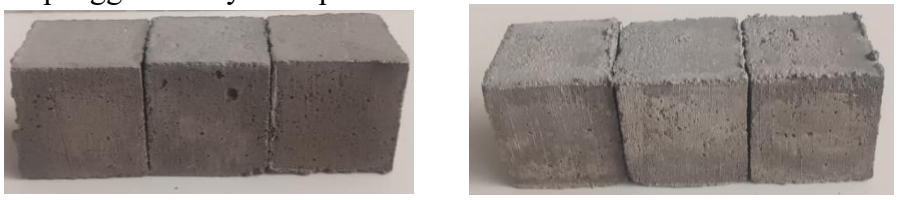
**Tabel 22. Hubungan Kuat Tekan dan Porositas**

| Variasi Mortar Geopolimer | Kuat Tekan (MPa) | Porositas (%) |
|---|---|---|
| 100% *Fly ash* (Suhu Tinggi) | 24,53 | 14,21 |
| 85% *Fly ash* 15% PPC (Suhu Tinggi) | 27,00 | 15,99 |
| 100% *Fly ash* (Suhu Ruangan) | 4,65 | 7,01 |
| 85% *Fly ash* 15% PPC (Suhu Ruangan) | 4,53 | 5,79 |
| 100% *Fly ash* (Suhu Lapangan) | 8,33 | 11,02 |
| 85% *Fly ash* 15% PPC (Suhu Lapangan) | 10,5 | 10,18 |

Tabel 22 menunjukkan hubungan porositas dan kuat tekan mortar geopolimer pada umur 14 hari, di mana mortar 100% fly ash memiliki porositas 14,21% (24,53 MPa) pada suhu tinggi, 7,01% (4,65 MPa) pada suhu ruangan, dan 11,02% (8,33 MPa) pada suhu lapangan, sedangkan mortar substitusi PPC 15% memiliki porositas 15,99% (27,00 MPa), 5,79% (4,53 MPa), dan 10,18% (10,5 MPa) berturut-turut (divisualisasikan pada Tabel 4.32); tingginya porositas pada curing suhu tinggi disebabkan oleh meningkatnya jumlah dan ukuran pori akibat suhu dan durasi curing yang lebih tinggi (Lamond & Pielert, 2006), serta penguapan air yang cepat yang menghambat proses geopolimerisasi optimal dan mendorong pembentukan pori tambahan di dalam mortar (Ken et al., 2015).

**Bentuk Fisik dan Kondisi Permukaan Mortar**

Pengamatan bentuk fisik menunjukkan bahwa mortar substitusi PPC 15% memiliki permukaan lebih kasar dan tidak rata akibat penyerapan air yang lebih banyak oleh campuran PPC, sedangkan mortar 100% fly ash memiliki permukaan lebih rata dan halus karena campurannya lebih encer; dari segi warna, mortar substitusi PPC 15% cenderung abu-abu terang akibat penggunaan semen, sementara mortar 100% fly ash cenderung berwarna cokelat karena penggunaan fly ash tipe F.



(a) (b)

**Gambar 21. Kondisi Permukaan Mortar 100% *Fly ash* (a), Subtitusi Semen *PPC* 15% (b)**

**Lapisan Putih Pada Permukaan Mortar**

Perubahan fisik berupa efloresensi—zat putih menyerupai kristal karbonat—terjadi pada mortar 100% fly ash dan substitusi PPC 15% yang dirawat pada suhu ruangan, akibat kondisi lembab yang menyebabkan kation alkali keluar melalui pori-pori dan bereaksi dengan CO2, sedangkan pada perawatan suhu tinggi dan suhu lapangan tidak ditemukan perubahan fisik pada kedua variasi mortar tersebut.



(a) (b) (c)

**Gambar 22. Mortar Geopolimer Suhu Tinggi (a), Suhu Ruang (b), Suhu Lapangan (c)**

Berdasarkan gambar diatas *Effloresence* lebih banyak terjadi pada mortar geopolimer perawatan suhu ruangan pada variasi *fly ash* 100% . Banyaknya *Effloresence* juga dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor lain reaksi polimerisasiyang tidak sempurna yang mana pada perawatan suhu ruangan tidak menghasilkan panas sehingga ion alkali dan air naik ke permukaan dan bereaksi dengan Co2 yang membentuk kristal karbonat.

## SIMPULAN

Berdasarkan hasil Analisa pada penelitian yang sudah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Mortar substitusi PPC 15% memiliki permukaan lebih kasar dan berwarna abu terang (akibat semen), sedangkan mortar 100% fly ash berwarna coklat gelap; efloresensi muncul pada kedua variasi hanya pada perawatan suhu ruangan, tanpa perubahan visual pada suhu tinggi dan lapangan.
2. Mortar substitusi PPC 15% memiliki kuat tekan lebih tinggi dibanding 100% fly ash, terutama pada suhu tinggi (60°C) dengan nilai tertinggi 9,76 MPa (7 hari), 29,56 MPa (14 hari), dan 30,87 MPa (28 hari), meski pada umur 7 dan 14 hari kuat tekannya sempat lebih rendah dari mortar fly ash; kuat tekan kedua variasi terus meningkat seiring umur, dan pada perawatan suhu tinggi keduanya tergolong mortar tipe M (kuat tekan minimum 17,2 MPa).
3. Porositas berkisar 5,03–17,29%, dengan rata-rata mortar fly ash sebesar 14,21% (suhu tinggi), 7,01% (suhu ruangan), 11,02% (suhu lapangan), dan mortar substitusi PPC 15% sebesar 15,99%, 5,79%, dan 10,18%; porositas tertinggi pada suhu tinggi disebabkan penguapan air yang membentuk pori, sejalan dengan meningkatnya jumlah dan ukuran pori akibat suhu dan durasi curing yang lebih tinggi (Lamond & Pielert, 2006).
4. Nilai absorpsi tertinggi terdapat pada mortar substitusi PPC 15% dengan perawatan suhu tinggi pada umur rendaman 24 jam sebesar 94,66 gram/cm², sedangkan nilai terendah pada variasi yang sama dengan perawatan suhu ruangan sebesar 8 gram/cm²; secara keseluruhan, metode perawatan dan komposisi mortar berpengaruh terhadap kuat tekan, porositas, dan absorpsi.

## DAFTAR PUSTAKA

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

Anisa, A., Zainuri, Z., & Megasari, S. W. (2024). Kekuatan Tekan dan Penyerapan Mortar Geopolimer dengan Bahan Tambah Limbah Abu Tempurung Kelapa. *Konstruksia*, *16*(1), 34–40.

ASTM C 1403-05. (2005). *Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars*. ASTM International.

ASTM C270. (n.d.). *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry*. ASTM International.

ASTM C33/C33M-13. (2013). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Concrete Aggregates*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0033

Bangun, A. J., Tarigan, J., & Perwira, A. (2021). Pengaruh Variasi Molar pada Kuat Tekan

Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly ash Pltu Pangkalan Susu. *Jurnal Syntax Admiration*, *2*(4), 546–557.

Candra, C. B., & Wardhono, A. (2019). Penggunaan Abu Sekam Padi sebagai Bahan Substitusi Fly ash pada Mortar Geopolimer dengan NaOH 10 Molar Ditinjau dari Kuat Tekan dan Porositas. *Rekayasa Teknik Sipil*, *7*(3).

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, *42*(9), 2917–2933.

Erlando, W., Frengki, G., & Hardjito, D. (2019). Pengaruh Urutan Pencampuran dan Komposisi Alkali Activator terhadap Karakteristik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Tipe C. *Jurnal Dimensi Pratama Teknik Sipil*, *1*, 350–357.

Fajri, F., Sariyusda, S., Bakhtiar, B., Fauzi, F., & Amru, A. (2021). Penerapan Mortar Geopolimer Ringan Berbasis Fly ash PLTU Pangkalan Susu dengan Penambahan EPS untuk Elemen Non Struktural. In *Prosiding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe* (Vol. 5, No. 1, pp. 185–189).

Fajrin, J., Al Fattaah, M. A., & Sugiartha, I. W. (2025). Sifat Fisik dan Mekanik Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Kapur Kerang dan Abu Terbang. *SIMANTECH Journal of Science and Technology*, *1*(1), 1–9.

Ghosh, K. (2012). Effect of %Na2O and %SiO2 on apparent porosity and sorptivity of flyash based geopolymer. *IOSR Journal of Engineering*, *2*(8), 96–101. https://doi.org/10.9790/3021-028196101

Harmaji, A., Claudia, C., Asri, L., Sunendar, B., & Nuruddin, A. (2019). Pengaruh Waktu Curing terhadap Kuat Tekan Geopolimer Berbasis Fly Ash. *Ensains Journal*, *2*(1), 50–54.

Iga, F., Wedhanto, S., & Yulistyorini, A. (2017). Pengaruh Mortar yang Dicampur Menggunakan Jenis dan Mutu Air yang Berbeda. (1).

Khoiriyah, N. L., & Maisytoh, P. (2016). Karakteristik Mortar Geopolimer dengan Perawatan Oven pada Berbagai Variasi Waktu Curing. *Jurnal Poli-Teknologi*, *15*(1).

Kurniawan, B., & Mokhtar, A. (2021). Pengaruh Pemanasan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolymer. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia UMM*, *1*(1).

Lasino, L., Setiati, N. R., & Cahyadi, D. (2017). Karakteristik Beton dengan Menggunakan Berbagai Jenis Semen (Concrete Characteristics Using Various Types of Cement). *Jurnal Jalan Jembatan*, *34*(1), 48–62.

Malik, Y. (2016). *Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Curing terhadap Sifat Fisik–Mekanik Semen Geopolimer Berbasis Slag Ferronickel* [Skripsi]. Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Murdock, L. J., & Brook, K. M. (1979). *Concrete materials and practice*. Edward Arnold (Publishers) Ltd.

Poloju, K. K., & Srinivasu, K. (2022). Influence of GGBS and concentration of sodium hydroxide on strength behavior of geopolymer mortar. *Materials Today: Proceedings*, *65*, 702–706.

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

Pugar Septia, G. (2011). *Studi literatur pengaruh konsentrasi NaOH dan rasio NaOH : Na2SiO3, rasio air/prekursor, suhu curing, dan jenis prekursor terhadap kuat tekan beton geopolimer* [Skripsi]. Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

Putra, A. K., Wallah, S. E., & Dapas, S. O. (2014). Kuat Tarik Belah Beton Geopolymer Berbasis Abu Terbang (Fly ash). *Jurnal Sipil Statik*, *2*(7), 330–336.

Rahmayani, I. S., Saputra, E., & Olivia, M. (2017). Kuat tekan dan porositas mortar menggunakan bahan tambah bubuk kulit kerang di air gambut. In *Prosiding Konferensi Nasional Teknik Sipil dan Perencanaan* (Vol. 15, No. 1, pp. 57–65).

Rika, E. (2025). *Pengaruh variasi komposisi abu tandan kosong kelapa sawit, polimer EVA dan suhu terhadap pembuatan mortar geopolimer* [Skripsi].

Salain, I. M. A. K. (2012). Pengaruh jenis semen dan jenis agregat kasar terhadap kuat tekan beton. *Teknologi dan Kejuruan*, *32*(1).

Samadhi, T. W., & Pratama, P. P. (2013). Pembuatan Geopolimer dari Metakaolin dan Abu Terbang. *11*(5), 265–274.

Satrio, M. (2014). Pengaruh Penggunaan Semen PPC (Portland Pozoland Cement) dengan FAS 0,4 terhadap Kuat Tekan, Modulus Elastisitas, dan Serapan Air pada Beton. *Scaffolding*, *3*(1).

Sengkey, S. L., Irmawaty, R., Hustim, M., & Purwanto, P. (2020, Agustus). Pengaruh Alkali Aktivator terhadap Workabilitas dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Fly ash Klas C. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS* (pp. 101–108).

Setiawan, D. F., & Wardhono, A. (2019). Penggunaan Abu Sekam Padi sebagai Bahan Substitusi Fly ash pada Mortar Geopolimer dengan NaOH 8 Molar ditinjau dari Kuat Tekan dan Porositas. *Rekayasa Teknik Sipil*, *7*(3).

Badan Standardisasi Nasional. (2002). *SNI 03-6861.1-2002, Spesifikasi Bahan Bangunan – Bagian A: Bahan Bangunan Bukan Logam*.

Badan Standardisasi Nasional. (2004). *SNI 15-0302-2004 tentang Semen Portland Pozolan* (p. 9).

Badan Standardisasi Nasional. (2004). *SNI 15-0302-2004 tentang Semen Portland Pozolan* (p. 9).

Badan Standarisasi Nasional. (2022). *SNI 2049-7:2022, Metode Uji Kuat Tekan Mortar Semen Hidraulis (dengan menggunakan spesimen kubus ukuran 2 in atau 50 mm)*.

Soamole, A., Sultan, M. A., & Tata, A. (2022). Efek Pemanasan terhadap Kuat Tekan Mortar Semen dengan Penambahan Fly ash. *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, *5*(1), 1–10.

Sultan, M. A., Hastira, D. P., & Kusnadi, K. (2025). Pengaruh Moralitas Natrium Hidroksida terhadap Kuat Tekan dan Porositas Mortar Ringan Geopolimer. *Techno (Jurnal Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Purwokerto)*, *26*(1), 19–24.

Wardhono, A. (2019). Pengaruh Pemanasan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Abu Terbang Kelas C. *Publikasi Riset Orientasi Teknik Sipil (Proteksi)*, *1*(1), 1–7.

Wijaya, M. F., Olivia, M., & Saputra, E. (2019). Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid menggunakan Semen Portland. *Jurnal Teknik*, *13*(1), 60–68.

Wijaya, M. F., Olivia, M., & Saputra, E. (2019). Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid menggunakan Semen Portland. *Jurnal Teknik*, *13*(1), 60–68.