

Pengaruh Penambahan Limbah Marmer Pada Mortar Geopolimer *Fly Ash* Dan Abu Sekam Padi Dengan Molaritas NaOH 12M

*Zhafira Hanny Azzahra, Arie Wardhono

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

*)zhafirahanny.21009@mhs.unesa.ac.id, ariewardhono@unesa.ac.id

Abstract

In the field of construction, cement is a material that is intrinsically linked to every infrastructure development. However, the production of cement results in CO₂ emissions, contributing to greenhouse gases that are environmentally unfriendly. To address this issue, innovations that can replace cement as a construction material are required. Geopolymers are introduced as a more environmentally friendly alternative, utilizing inorganic binders such as alumina-silica polymers. Geopolymers make use of sustainable base materials like fly ash, rice husk ash, slag, and kaolin, all of which are abundant in silica and alumina. This research employs the geopolimer concept in the creation of mortar, with fly ash and rice husk ash as substitutes for Portland cement. The study focuses on the effect of adding marble waste to fly ash and rice husk ash-based geopolimer mortar with a NaOH 12 M activator solution. The variations in marble waste addition used are 0%, 10%, 20%, and 30%. The results of the study indicate that the incorporation of marble waste effectively enhances the compressive strength of the mortar.

Keywords: Geopolymer Mortar, Fly Ash, Rice Husk Ash, Marble, Compressive Strength, Porosity, Setting Time

Abstrak

Dalam bidang konstruksi, semen merupakan material yang sangat erat kaitannya pada setiap pembangunan infrastruktur. Pada proses pembuatannya, Produksi semen menghasilkan emisi yang signifikan, terutama karbon dioksida (CO₂), yang berkontribusi pada pemanasan global. Manufaktur semen adalah salah satu sumber terbesar emisi CO₂ industri, menyumbang sekitar 8% dari emisi karbon global. Untuk mengatasi kasus ini, maka diperlukan penemuan yang dapat menggeser semen sebagai material konstruksi. Geopolimer diperkenalkan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan karena Mengaplikasikan bahan perekat anorganik seperti alumina-silika polimer. Geopolimer menggunakan bahan dasar yang ramah lingkungan seperti *fly ash*, abu sekam padi, slag, kaolin yang mengandung banyak silika dan alumina. Penelitian ini menggunakan konsep geopolimer dalam pembuatan mortar berbahan dasar abu terbang atau *fly ash* dan abu sekam padi sebagai pengganti semen portland. Penelitian ini berfokus pada pengaruh penambahan limbah marmer pada mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan abu sekam padi dengan larutan aktivator berupa NaOH 12 M. Variasi penambahan limbah marmer yang digunakan adalah 0%, 10%, 20% dan 30%. Penelitian ini mempresentasikan bahwa penambahan limbah marmer secara signifikan meningkatkan kekuatan tekan mortar.

Kata Kunci: Mortar Geopolimer, *Fly Ash*, Abu Sekam Padi, Marmer, Kuat Tekan, Porositas, *Setting Time*

PENDAHULUAN

Pada era modern ini, isu *green infrastructure* menjadi perbincangan global karena maraknya bencana kerusakan lingkungan, yang memicu tuntutan untuk penerapan *green construction* dan *green material construction*. Permintaan semen portland meningkat seiring dengan pembangunan infrastruktur, yang juga meningkatkan emisi CO₂, di mana setiap ton semen menghasilkan sekitar satu ton CO₂ (Solikin, 2021).

Untuk mengatasi masalah ini, geopolimer diperkenalkan sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan (Davidovits, 1994), yaitu bahan yang disintesis dari bahan-bahan non organik alam melalui proses polimerisasi. Geopolimer menggunakan material limbah pabrikasi seperti *fly ash*, *slag*, serta abu sekam padi, yang mengurangi ketergantungan pada semen portland (Solikin, 2021). Mortar geopolimer merupakan jenis mortar yang menggunakan oksida silika dan alumina dengan jumlah tinggi sebagai komponen pengikat (Riyanto et al., 2021). Pembuatan geopolimer hanya memerlukan suhu sekitar 25°C, jauh lebih rendah dibandingkan produksi semen yang mencapai 800°-1400°C (Luntungan et al., 2019).

Fly ash, atau abu terbang, merupakan hasil sampingan dari pembakaran batu bara halus (Shaish et al., 2021). Partikelnya berbentuk sferis, memungkinkan pencampuran serta aliran yang lebih mudah dalam suatu

komposisi. Sebagai bahan utama dalam produksi beton geopolimer, *fly ash* kaya akan unsur kimia silikon (Si) dan aluminium (Al) (Setiawati et al., 2022). *Fly ash* tidak memiliki sifat pengikat seperti semen, maka diperlukan cairan alkali aktivator sebagai perekat dalam proses pembentukan beton geopolimer (Bangun et al., 2021).

Selain itu, untuk menciptakan komposit yang lebih ramah lingkungan, perlu digunakan bahan alternatif yang kaya akan SiO₂ seperti abu sekam padi. Abu sekam padi merupakan produk sampingan yang diperoleh dengan membakar sekam padi untuk berbagai keperluan pemanasan (Nuaklong et al., 2019). Proses pembakaran hingga suhu 1000°C menyebabkan perubahan silika amorf pada sekam padi menjadi bentuk kristalin. Abu sekam padi memiliki kadar silika tinggi berkisar 94-96% sehingga abu sekam padi berpotensi menjadi material dengan aplikasi yang luas pada berbagai bidang industri (Zebua & Sinulingga, 2018).

Selain itu, Limbah marmer merupakan produk sampingan dari industri pemotongan dan pengolahan marmer yang dihasilkan dalam bentuk agregat berbeda ukuran (Gill et al., 2024). Pengolahan batu marmer juga menghasilkan limbah yang signifikan, sekitar 40% dari keseluruhan produk marmer. Sisa serbuk marmer dari pengolahan marmer seringkali dibiarkan begitu saja tanpa pemanfaatan secara optimal hingga menyebabkan masalah lingkungan dan kesehatan (Badaron et al., 2019). Studi ini

menggunakan limbah marmer untuk meningkatkan kegunaannya dan mengurangi jumlah limbah. Marmer mengandung SiO_2 , CaO , dan MgO yang juga terdapat dalam semen dan memiliki kekuatan tekan tinggi (Arizona & Wardhono, 2020). Limbah marmer memiliki kandungan CaO sebesar 48,98% sehingga layak digunakan sebagai *material binder* dalam pembuatan mortar geopolimer ramah lingkungan (Khan et al., 2023).

Penelitian sebelumnya telah meneliti pengaruh penambahan limbah marmer pada mortar geopolimer berbasis abu terbang dengan variasi molaritas NaOH yang berbeda. Adapun penelitian yang dilakukan oleh (Wijayanti & Wardhono, 2021), yang menggunakan limbah marmer sebagai material substitusi dengan metode *wet mixing*. Dalam metode ini, dilakukan penambahan kapur pada saat pembuatan aktivator kering yaitu NaOH 12 molar. Pada penelitian ini, penggunaan NaOH 12M menunjukkan pengaruh terhadap kekuatan tekan dengan menambahkan substitusi limbah marmer dalam berbagai variasi yaitu 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25%. Hasil terbaik diperoleh pada variasi 15% dengan kekuatan tekan sebesar 8,881 MPa.

Penelitian menunjukkan bahwa penambahan limbah marmer secara signifikan meningkatkan nilai kuat tekan, dengan puncak tertinggi tercapai pada persentase limbah marmer 10%-20%, sedangkan penurunan kuat tekan diamati pada persentase > 20% (Triantono & Wardhono, 2019). Hal ini membuktikan bahwa dari segi kuat tekan, substitusi limbah marmer terhadap fly ash mampu meningkatkan kekuatan beton akibat reaksi kimia antara Ca dan H_2O yang menghasilkan CaCO_3 yang keras. Namun, semakin tinggi persentase substitusi limbah marmer terhadap fly ash, kekuatan tekan beton justru akan menurun. Jika dilihat dari porositas, substitusi limbah marmer terhadap fly ash dapat mengurangi porositas, tetapi dengan persentase substitusi yang lebih tinggi, porositas justru akan meningkat (Fitriahsari & Wardhono, 2018).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak penambahan limbah marmer dalam produksi mortar geopolimer berbasis fly ash dan abu sekam padi dengan menggunakan NaOH 12 M sebagai alkali aktivator. Studi ini menganalisis kuat tekan, porositas, dan waktu pengerasan yang dihasilkan guna menentukan kelayakannya sebagai alternatif material ramah lingkungan pengganti semen portland.

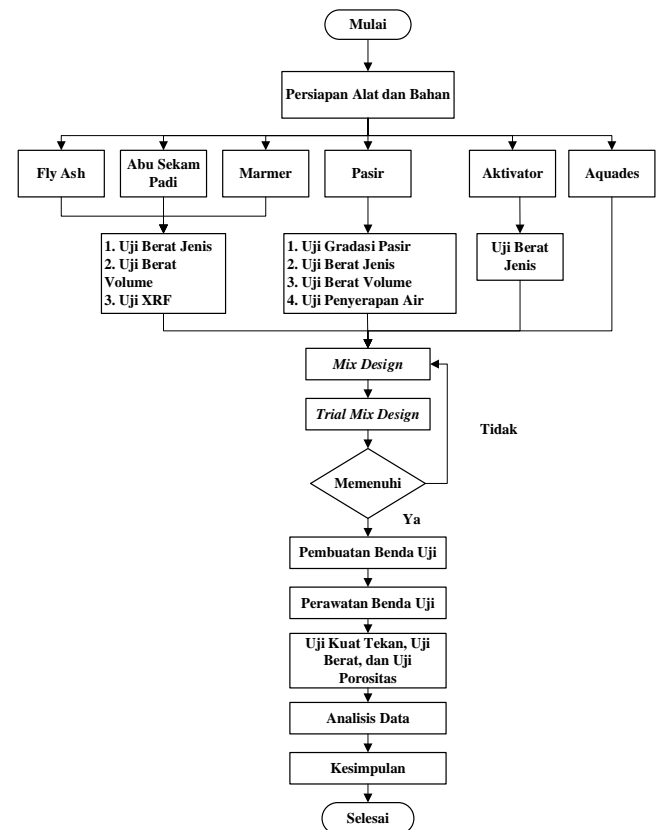
METODE

Penelitian ini bersifat eksperimental dan didasarkan pada sumber yang sudah ada, seperti jurnal dan karya ilmiah sebelumnya, yang akan digunakan sebagai landasan untuk peningkatan dan pengembangan komposisi mortar geopolimer lebih lanjut.. Mortar geopolimer yang digunakan berbahan dasar fly ash dan abu sekam padi menggunakan bahan tambahan limbah marmer dengan larutan aktivator berupa NaOH 12 M dan sodium silikat. Studi tentang mortar geopolimer dilakukan untuk mengidentifikasi efek substitusi limbah marmer terhadap kekuatan tekan dan porositas mortar geopolimer.

Dalam studi ini, data dikumpulkan melalui metode observasi. Metode ini dilakukan dengan melakukan observasi terhadap spesimen uji, yaitu mortar geopolimer. Data yang dikumpulkan dari observasi mencakup ukuran,

dimensi, massa, sifat spesimen uji, data berat jenis, data berat volume, data kuat tekan, data porositas, data pengujian vicat, serta dokumentasi berupa gambar selama proses penelitian.

Eksperimen ini dilaksanakan di Laboratorium Bahan Jalan dan Beton, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya. Desain penelitian disajikan pada *flow chart* berikut:



Gambar 1. Flow Chart Penelitian

1. Tahap 1 (Persiapan)

Sebelum pelaksanaan penelitian dimulai, peralatan serta material perlu dipersiapkan terlebih dahulu. Material yang perlu disiapkan antara lain dari fly ash, abu sekam padi (RHA), marmer, NaOH , aqua DM, sodium silikat, dan pasir.

2. Tahap 2 (Pengujian Material)

Pengujian bahan pada penelitian mortar geopolimer ini mencakup:

- Pengujian agregat halus, mencakup: uji berat jenis, uji berat volume, uji gradasi pasir, dan uji penyerapan air. Uji berat jenis pada penelitian ini mengacu pada standar SNI 1970:2016. Uji berat volume mengacu pada acuan ASTM C 29/C 29M 97 (2009) dengan persyaratan berat volume untuk agregat halus adalah antara 1,6 hingga 1,9 Kg/L.

$$\text{Berat Volume} = \frac{W_2 - W_1}{A} \quad (1)$$

Keterangan : W_2 = berat moulding dan benda uji (Kg); W_1 = berat moulding (Kg); A = volume moulding (L)

Pada penelitian ini, uji gradasi pasir menggunakan acuan SNI 03-1968-1990. Pasir yang dipakai yaitu pasir lumajang. Uji penyerapan air pada agregat halus mengacu pada standar SNI 1970:2016. Menurut ASTM C128-07A (2009), syarat penyerapan air pada agregat halus berkisar antara 0,2% - 2%.

$$Sw = \left(\frac{S-A}{A} \right) \times 100\% \quad (2)$$

Keterangan: Sw = Penyerapan air (%); S = berat benda uji pada kondisi permukaan jenuh kering (SSD); A = berat kering setelah dioven

- b. Pengujian *fly ash*, RHA, dan marmer, mencakup: uji berat jenis, uji berat volume, dan uji XRF.
- c. Pengujian berat jenis untuk larutan aktivator NaOH dan sodium silikat.

3. Tahap 3 (*Trial Mix Design*)

Trial Mix Design merupakan tahap percobaan pembuatan benda uji dengan penggunaan komposisi yang berbeda-beda. Perbedaan komposisi yang dimaksud adalah rasio komposisi *fly ash* dan abu sekam padi, rasio variasi limbah marmer, dan komposisi larutan. Uji coba dilakukan sebanyak 10 kali untuk mendapatkan komposisi campuran yang sesuai. Kesesuaian dilihat dari nilai kuat tekan, *workability*, serta tekstur adonan mortar. Benda uji trial diuji kuat tekan pada usia 7 hari dengan proses curing suhu ruang. Nilai kuat tekan rencana pada penelitian ini adalah mortar tipe N, dengan kuat tekan $\geq 5,2$ MPa. Rasio *trial* yang dilakukan pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 1 di bawah ini:

Komposisi yang menghasilkan hasil terbaik akan digunakan sebagai acuan pembuatan *mix design* untuk penelitian lebih lanjut. *Trial 1* dilakukan untuk mengetahui kelayakan *fly ash* serta mengetahui perbandingan larutan aktivator yang akan digunakan. *Trial 2* dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan abu sekam padi sebagai substitusi *fly ash* dalam pembuatan mortar geopolimer. *Trial 3* dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah marmer dalam pembuatan mortar geopolimer.

Tabel 1. Rasio *Trial Mix Design*

No	Benda Uji	FA	RHA	MR	PS	SH	SS	Air
1	T1	1			2,75	0,12	0,42	0,145
2	T2	1			2,75	0,161	0,564	0,068
3	T3	1			2,75	0,104	0,468	0,133
4	T4	1			2,75	0,139	0,626	0,053
5	T5	0,8	0,2		2,75	0,12	0,42	0,145
6	T6	0,8	0,2		2,75	0,12	0,42	0,186
7	T7	0,8	0,2		2,75	0,12	0,42	0,254
8	T9	0,8	0,2	0,1	2,75	0,12	0,42	0,254
9	T10	0,8	0,2		2,75	0,14	0,628	0,323
10	T12	0,8	0,2	0,1	2,75	0,14	0,628	0,323

Komposisi yang menghasilkan hasil terbaik akan digunakan sebagai acuan pembuatan *mix design* untuk penelitian lebih lanjut. *Trial 1* dilakukan untuk mengetahui kelayakan *fly ash* serta mengetahui perbandingan larutan aktivator yang akan digunakan. *Trial 2* dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan abu sekam padi sebagai substitusi *fly ash* dalam pembuatan mortar geopolimer. *Trial 3* dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan limbah marmer dalam pembuatan mortar geopolimer

Pada *trial* ini diperoleh hasil kuat tekan dan *workability* yang baik untuk pembuatan mortar geopolimer. Berikut adalah tabel hasil *trial* yang telah dilakukan:

Tabel 2. Tabel Hasil *Trial Mix Design*

No	Benda Uji <i>Trial</i>	Kondisi Campuran Mortar	Kondisi Benda Setelah 24 Jam	Hasil Uji Kuat Tekan (MPa)
1	T1	Cair, tidak menggumpal	Padat	12,668
2	T2	Cair, tidak menggumpal	Padat	22,414
3	T3	Cair, tidak menggumpal	Padat	20,902
4	T4	Kental, tidak menggumpal	Padat	15,678
5	T5	Sangat Kering	Padat	6,904
6	T6	Agak kering, menggumpal	Padat	10,554
7	T7	Agak Kering, tidak menggumpal	Padat	8,841
8	T8	Kering, menggumpal	Padat	7,025
9	T9	Kental, homogen, tidak menggumpal	Padat	5,821
10	T10	Kental, tidak menggumpal	Padat	4,140

Berdasarkan *trial mix design* yang dilakukan, rasio *mix design* yang digunakan sebagai acuan *final mix design* adalah T9 karena memiliki *workability* yang baik serta kuat tekan yang didapatkan memenuhi kuat tekan rencana.

4. Tahap 4 (*Mix Design*)

Pada penelitian ini mengkaji berbagai kombinasi marmer, *fly ash*, dan abu sekam padi (RHA) sebagai pengganti sepenuhnya semen portland. Sampel mortar Memiliki bentuk kubus berukuran 50 mm x 50 mm x 50 mm. Sampel kemudian diuji guna mengetahui nilai kuat tekan serta porositas pada mortar berumur 7, 14, dan 28 hari masing-masing usia 3 sampel untuk kuat tekan dan 2 sampel untuk porositas.

Variabel bebas yang dipakai adalah variasi rasio substitusi marmer sebesar 10%, 20%, dan 30%. Variabel tersebut digunakan untuk mengetahui bagaimana pengaruh penambahan limbah marmer terhadap rasio *fly ash* dan abu sekam padi, serta rasio SS/SH dan W/S yang digunakan. Penelitian ini menggunakan variabel terikat yaitu kuat tekan, porositas, dan vikat. Variabel kontrol yang diaplikasikan dalam studi ini meliputi Molaritas NaOH 12 M, Pasir Lumajang = 2,75, NaOH = 0,14, Sodium Silikat = 0,628, perbandingan *fly ash*, RHA, dan marmer = 0,8:0,2:0,1, *fly ash* kelas C, serta aqua DM. Susunan *mix design* ditinjau pada Tabel. 3 berikut:

Tabel 3. Tabel *Final Mix Design*

Mix	Mix Design	FA	RHA	MR	PS	SH	SS	Air
1	MIX 1 0% MR	0,8	0,2		2,75	0,14	0,628	0,323
2	MIX 2 10% MR	0,8	0,2	0,1	2,75	0,14	0,628	0,323
3	MIX 3 20% MR	0,8	0,2	0,1	2,75	0,14	0,628	0,323
4	MIX 4 30% MR	0,8	0,2	0,1	2,75	0,14	0,628	0,323

5. Tahap 4 (*Curing*)

Proses *curing* benda uji dilakukan dengan menyimpan sampel benda uji dalam keadaan suhu ruang. Benda uji harus terlindungi dari sinar matahari secara langsung maupun hujan sampai waktu pengujian tiba.

6. Tahap 5 (Pengujian)

Terdapat 3 macam pengujian pada sampel benda uji, yakni kuat tekan, porositas dan vicat.

a. Uji Kuat Tekan

Standar yang diterapkan untuk uji kuat tekan adalah standar SNI 03-1974-1990. Peralatan yang dipakai yaitu *Universal Testing Machine* (UTM). Benda uji yang diujikan adalah mortar geopolimer berumur 7, 14, dan 2 hari sebanyak 3 buah mortar untuk setiap *mix design* dan usia.

$$F'm = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Keterangan: F'm = Kuat tekan mortar (kg/cm²); P = Beban maksimum (kg); A = Luas penampang (cm²)

b. Uji Porositas

Standar yang diterapkan pada uji porositas yaitu menggunakan standar ASTM-C 642-06 (2006). Benda uji yang diujikan adalah mortar geopolimer berumur 7, 14, dan 2 hari masing-masing sebanyak 2 buah mortar untuk setiap *mix design* dan usia.

c. Uji Vicat

Pengujian Vicat pada penelitian ini menggunakan standar ASTM C 191-081. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur waktu pengikatan awal dan akhir dari campuran mortar geopolimer.

7. Tahap 6 (Pengolahan Data)

Data dianalisis guna memahami implikasi penambahan marmer terhadap fly ash (FA) dan RHA, kuat tekan, porositas, serta hubungan antar usia sampel benda uji.

8. Tahap 7 (Kesimpulan)

Data yang dikumpulkan dari penelitian ini diolah dan dianalisis untuk menarik kesimpulan mengenai tujuan penelitian yang dilakukan

HASIL DAN PEMBAHASAN

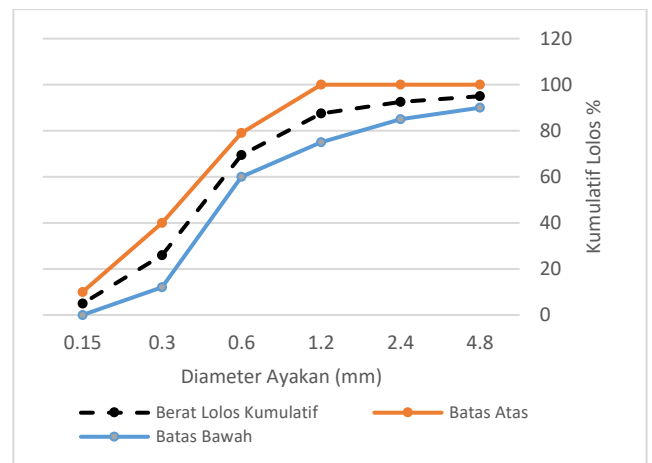
Hasil Uji Material

1. Agregat Halus

Data pengujian agregat halus disajikan pada tabel di bawah ini:

Tabel 4. Hasil Pengujian Agregat Halus

No.	Uraian	Hasil Pengujian	Standar SNI
1	Uji Berat Jenis	2,517 gr/cm ³	Minimal 2,5 gr/cm ³
2	Uji Berat Volume	1,699 kg/L	1,5 - 2,0 gr/cm ³
3	Uji Gradasi pasir	Zona 3, FM = 3,245	FM = 1,5 - 3,80
4	Uji Penyerapan Pasir	1,68%	<5%



Gambar 2. Grafik Hasil pengujian Gradasi Pasir

Dari hasil pengujian, disimpulkan bahwa pasir memenuhi persyaratan sebagai agregat halus, terkecuali pada pengujian penyerapan air. Persentase penyerapan air pasir lumajang menunjukkan angka 1,68% yang berarti pasir memiliki daya serap yang kecil.

2. Fly Ash

Uji XRF pada *fly ash* dilaksanakan di Laboratorium Sentral Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang. Adapun data pengujian ditunjukkan pada tabel di bawah:

Tabel 5. Hasil Pengujian XRF *Fly Ash*

Komponen Kimia	Persentase (%)
Al	7,3
Si	17,4
S	0,3
K	1,92
Ca	25,8
Ti	1,3
V	0,057
Cr	0,099
Mn	0,04

Fe	41,8
Ni	0,03
Cu	0,078
Zn	0,01
Sr	0,64
Mo	1,3
Ba	0,58
Eu	0,4
Yb	0,06
Re	0,3
Hg	0,2

Dari hasil uji XRF di atas mengindikasikan bahwa unsur dominan pada *fly ash* adalah Fe (besi) sebanyak 41,8%, Ca (Kalsium) sebanyak 25,8%, Si (silika) 17,4%, dan Al (alumina) 7,3%. Hasil pengujian XRF menunjukkan bahwa *fly ash* termasuk dalam tipe C, di mana besar kandungan $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ($41,8\% + 25,8\% + 17,4\% + 7,3\% = 66,5\%$) $> 50\%$ dan kandungan Ca = 25,8% $> 10\%$ sesuai dengan acuan ASTM C168. Hasil pengujian berat jenis *fly ash* menunjukkan nilai sebesar 2,632 g/cm³. Sedangkan hasil pengujian berat volume *fly ash* menunjukkan nilai sebesar 0,195 kg/L.

3. Rice Husk Ash (RHA)

Pengujian XRF RHA dilaksanakan di Laboratorium Sentral Mineral dan Material Maju, Universitas Negeri Malang. Adapun hasil pengujian ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 6. Hasil Pengujian XRF RHA

Komponen Kimia	Persentase (%)
Si	81,1
K	13,5
Ca	3,23
Mn	0,74
Fe	1,04
Cu	0,1
Eu	0,09
Re	0,2
Zn	0,03

Berdasarkan tabel di atas, menunjukkan bahwa kandungan terbesar yang terkandung dalam abu sekam padi adalah Si (silika) yaitu sebesar 81,1%. Hasil pengujian berat jenis RHA menunjukkan angka 2 g/cm³. Sedangkan hasil pengujian berat volume menunjukkan angka sebesar 0,263 kg/L.

4. Marmer

Hasil pengujian XRF marmer dapat ditinjau pada tabel berikut:

Tabel 7. Hasil Pengujian XRF Marmer

Komponen Kimia	Persentase (%)
Ca	98,8
Ti	0,04
Mn	0,054
Fe	0,46
Cu	0,047
Mo	0,28
Ba	0,1
Lu	0,19

Berdasarkan tabel di atas, menunjukkan bahwa kandungan terbesar yang terkandung dalam abu sekam padi adalah Ca (kalsium) yaitu sebesar 98,8%. Hasil pengujian berat jenis marmer menunjukkan angka 2,632 g/cm³. Sedangkan hasil pengujian berat volume menunjukkan angka sebesar 0,263 kg/L.

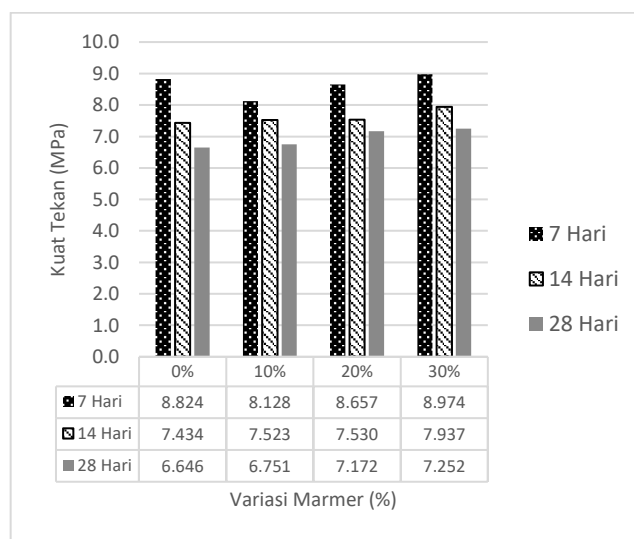
5. Larutan Aktivator

Pada penelitian ini, larutan aktivator yang dipakai yaitu NaOH 12 M dan sodium silikat. Hasil pengujian berat jenis NaOH 12 M menunjukkan angka sebesar 1,276 g/cm³. Sedangkan hasil pengujian berat jenis sodium silikat, menunjukkan hasil sebesar 1,508 g/cm³.

Hasil Pengujian

1. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Uji kekuatan tekan diterapkan pada mortar umur 7, 14, dan 28 hari. Hasil kuat tekan didapatkan dari perbandingan antara kapasitas beban maksimum yang dapat dicapai oleh mortar hingga hancur dengan luas penampang yang diberi beban. Perhitungan kuat tekan mortar mengikuti standar SNI 03-1974-1990. Hasil pengukuran kekuatan tekan mortar geopolimer dapat ditinjau dalam grafik di bawah ini:



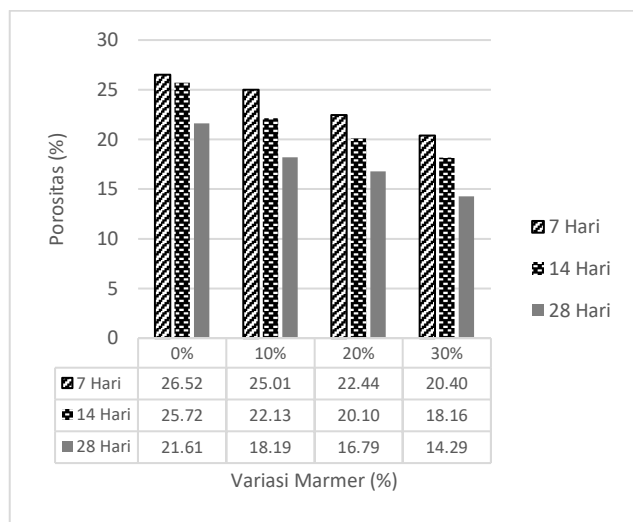
Gambar 3. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan pada Usia 7, 14, dan 28 Hari

Berdasarkan hasil pengujian kuat tekan mortar, grafik di atas menunjukkan adanya peningkatan nilai kuat

tekan di atas penambahan limbah marmer 10%. Hasil berbanding terbalik terhadap penelitian terdahulu (Fitriahsari & Wardhono, 2018) dan (Triantono & Wardhono, 2019) yang menyatakan nilai kuat tekan mortar akan menurun terhadap substitusi limbah marmer di atas 15%. Hal ini terjadi akibat pengaruh substitusi abu sekam padi dengan terhadap *fly ash* yang menyebabkan terciptanya ikatan antar partikel yang lebih kuat sehingga mengurangi kelemahan struktural.

2. Hasil Pengujian Porositas Mortar Geopolimer

Pengujian porositas diterapkan pada sampel berusia 7, 14, dan 28 hari. Sebelum diuji, sampel menjalani proses curing pada suhu kamar terlebih dahulu, kemudian direndam dalam air selama satu hari atau 24 jam sebelum pengujian porositas. Perhitungan porositas mortar mengacu pada ASTM-C 642-06. Hasil pengujian porositas dapat dilihat pada grafik berikut:

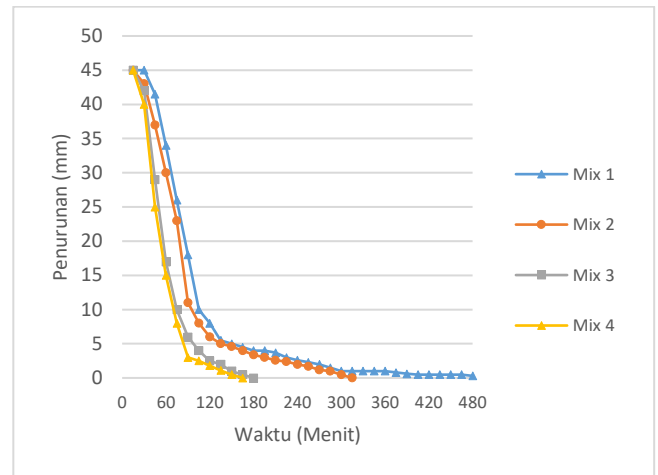


Gambar 4. Grafik Hasil Pengujian Porositas pada Usia 7, 14, dan 28 Hari

Berdasarkan hasil pengujian porositas mortar, grafik di atas menunjukkan penurunan seiring dengan penambahan limbah marmer. Hal ini terjadi akibat limbah marmer memiliki partikel halus yang berfungsi sebagai *material binder*, sehingga mengisi celah dan pori-pori dalam struktur mortar. Semakin banyak limbah marmer yang ditambahkan, semakin padat struktur mortar, sehingga mengurangi jumlah pori yang terbuka

3. Hasil Pengujian Vicat

Perhitungan pengujian vicat mortar mengacu pada ASTM C 191-08. Adapun hasil pengujian vicat dapat ditinjau pada grafik berikut:



Gambar 5. Grafik Hasil Pengujian Vicat

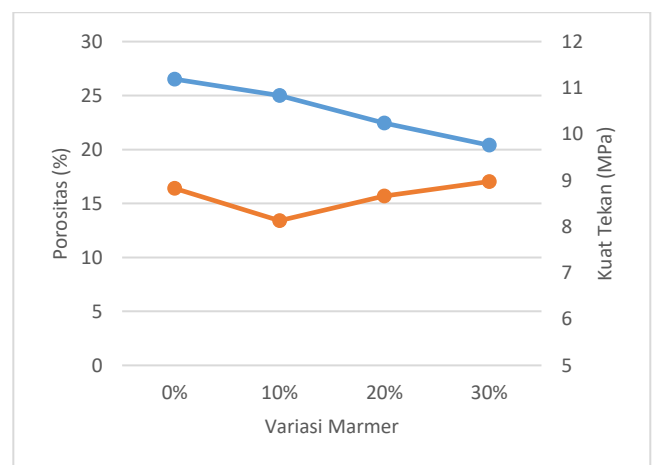
Berdasarkan pengujian vicat, grafik menunjukkan adanya peningkatan *setting time* seiring dengan penambahan limbah marmer. Hal ini disebabkan oleh limbah marmer mengandung CaO yang tinggi dapat mempercepat reaksi polimerisasi sehingga mortar lebih cepat mengeras.

4. Analisis dan Pembahasan

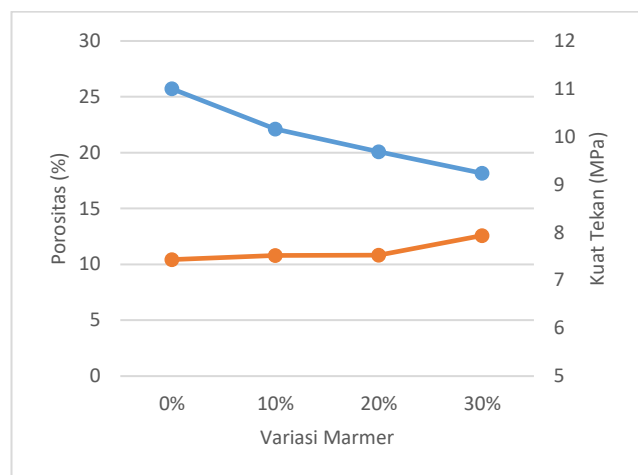
Hasil penelitian mengindikasikan analisis kuat tekan tertinggi berada pada umur 7 hari. Hasil kuat tekan dapat diaplikasikan untuk mengetahui kualitas pada mortar. Dalam penelitian ini, analisis dilakukan terhadap hubungan antara kekuatan tekan dan porositas, analisis penambahan marmer terhadap kuat tekan, dan analisis penambahan marmer terhadap porositas.

a. Analisis hubungan kuat tekan terhadap porositas

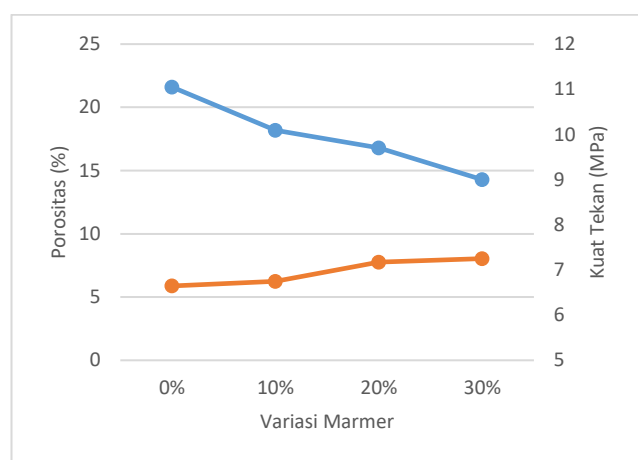
Analisis ini memiliki tujuan untuk menganalisis bagaimana porositas mortar mempengaruhi kekuatan tekan yang dihasilkan. Proses analisis dilakukan dengan menggabungkan data hasil uji kuat tekan serta uji porositas ke dalam grafik. Analisis ini meninjau hasil pengujian pada mortar yang berumur 7, 14, dan 28 hari. Berikut adalah grafik gabungan hasil kuat tekan dan porositas mortar geopolimer:



Gambar 6. Grafik Hubungan Kuat Tekan dan Porositas pada Usia 7 Hari



Gambar 7. Grafik Hubungan Kuat Tekan dan Porositas pada Usia 14 Hari



Gambar 8. Grafik Hubungan Kuat Tekan dan Porositas pada Usia 28 Hari

Merujuk pada hasil pengujian kekuatan tekan serta porositas yang ditampilkan pada Gambar 4, terlihat bahwa kekuatan tekan optimal pada usia 7 hari dicapai oleh *mix design* 4. Dengan penambahan marmer sebesar 30% ke dalam mortar geopolimer, diperoleh nilai kekuatan tekan sebesar 8,974 MPa. Sementara itu nilai porositas terendah juga diperoleh dari *mix design* 4 dengan hasil sebanyak 20,40%. Hasil kuat tekan terkecil diperoleh *mix design* 2 dengan nilai sebesar 8,128 MPa dan nilai porositas sebesar 25,01%. Hasil porositas terbesar diperoleh *mix design* 1 yang merupakan *mix design* kontrol tanpa tambahan substitusi marmer (marmer 0%) yaitu sebesar 26,52%.

Pada Gambar 5, grafik tersebut mengindikasikan penurunan hasil kuat tekan dan porositas mortar geopolimer yang berumur 14 hari. *Mix design* 4 menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi sebesar 7,937 MPa, serta memiliki nilai porositas terkecil sebesar 18,16%. Sedangkan nilai kuat tekan terkecil didapat *mix design* 1 dengan nilai sebesar 7,434 MPa dengan angka porositas tertinggi yaitu sebesar 25,72%.

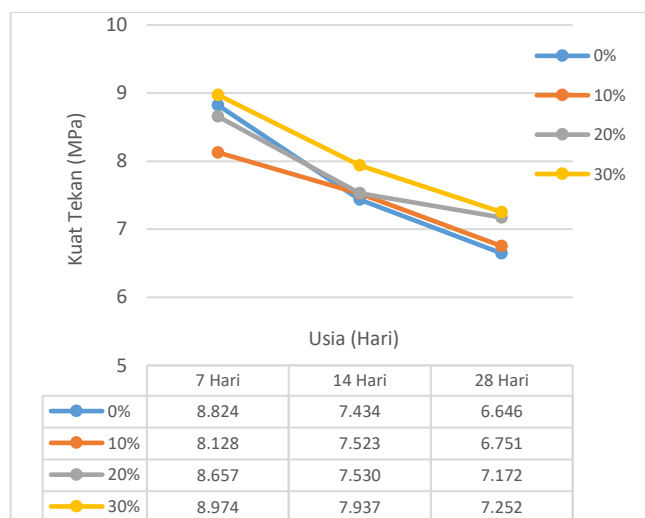
Pada Gambar 6. Grafik menunjukkan adanya penurunan angka kuat tekan dan porositas lagi pada usia 2 hari. Angka kuat tekan tertinggi diperoleh *mix design* 4 dengan angka sebesar 7,252 MPa dengan nilai porositas terendah yaitu sebesar 14,29%. Sedangkan nilai kuat tekan

terkecil diperoleh *mix design* 1 dengan nilai sebesar 6,646 MPa dengan nilai porositas tertinggi yaitu 21,61%.

Dari ketiga grafik yang disajikan dapat disimpulkan bahwa kandungan marmer dalam kondisi NaOH 12 M mampu memperkuat nilai kuat tekan pada mortar geopolimer. Berdasarkan analisis ini, disimpulkan bahwa terdapat hubungan invers atau perbandingan terbalik antara porositas dan kekuatan tekan benda uji.

b. Analisis Hubungan Kuat Tekan dengan Usia Mortar Geopolimer

Keterkaitan antara kekuatan tekan dan umur mortar geopolimer ditampilkan dalam grafik berikut.



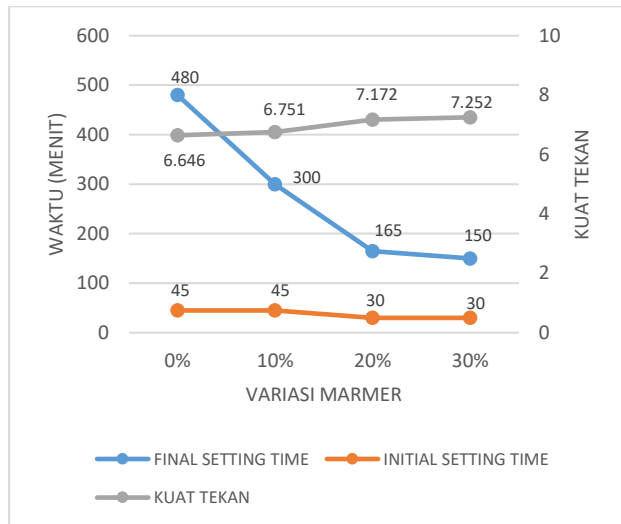
Gambar 9. Grafik Hubungan Kuat Tekan dengan Usia Mortar Geopolimer

Dari grafik di atas, terlihat bahwa angka kuat tekan yang dihasilkan mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya usia benda uji. Benda uji mengalami penurunan nilai kuat tekan yang signifikan ketika berumur 14 hari, namun pada usia 28 hari, penurunan tersebut tidak terlalu signifikan atau cenderung stabil. Selanjutnya hasil penurunan pada *mix design* 1 dengan tanpa penambahan marmer menunjukkan penurunan sebesar 1,39 MPa pada mortar berumur 14 hari dan 0,788 MPa untuk mortar berumur 28 hari. *Mix design* 2 mengalami penurunan sebesar 0,605 MPa dan 0,772 MPa pada usia 28 hari. *Mix design* 3 menunjukkan penurunan sebesar 1,127 MPa dan 0,358 MPa pada usia 28 hari. *Mix design* 4 mengalami penurunan sebesar 1,037 MPa pada usia 14 hari dan 0,685 MPa pada usia 28 hari.

Berdasarkan analisis di atas, disimpulkan bahwa kuat tekan yang dihasilkan berbanding terbalik dengan usia benda uji. Sementara itu, penambahan serbuk marmer pada mortar geopolimer yang berbasis *fly ash* dan RHA dengan kondisi NaOH 12 M mempengaruhi usia pada mortar. Mortar mencapai puncak kekuatan tekan maksimum pada usia 7 hari, kemudian mengalami penurunan hingga stabil pada usia 14 dan 28 hari.

c. Analisis Hubungan Penambahan Marmer dan Vicat

Hubungan antara penambahan marmer dan vicat disajikan dalam grafik berikut:



Gambar 10. Grafik Hubungan Kuat Tekan dengan Vicat

Berdasarkan grafik di atas, dapat dilihat bahwa adanya peningkatan *setting time* dari mix 1 ke mix 4. Hal ini terjadi karena tingginya kandungan Ca pada marmer dapat mempengaruhi mortar geopolimer sehingga mortar semakin cepat mengeras. Semakin banyak persentase variasi marmer yang ditambahkan, maka mengakibatkan adanya peningkatan *setting time* pada pasta mortar. Waktu ikat akhir mengalami peningkatan hingga mencapai puncak pada substitusi marmer 30% yang memiliki waktu ikat akhir pada menit ke-150.

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari pembahasan dan analisis yang telah dipaparkan di atas mencakup beberapa poin penting, yakni:

1. Kuat tekan berbanding terbalik dengan usia benda uji. Sedangkan penambahan marmer terhadap mortar geopolimer berbasis *fly ash* serta RHA pada kondisi NaOH 12 M memiliki pengaruh pada usia mortar. Mortar mencapai kekuatan tekan maksimum pada usia 7 hari, lalu mengalami penurunan hingga stabil pada usia 14 hari dan 28 hari. Hasil dari kuat tekan mortar geopolimer pada umur 7 hari berturut-turut adalah 8,824 MPa, 8,128 MPa, 8,657 MPa, dan 8,974 MPa. Sedangkan nilai kekuatan tekan mortar geopolimer pada usia 28 hari berturut-turut adalah 6,646 MPa, 6,751 MPa, 7,172 MPa, 7,252 MPa.
2. Kandungan marmer dalam kondisi NaOH 12 M berpotensi meningkatkan kekuatan tekan pada mortar geopolimer. Dalam penelitian ini, komposisi optimum untuk penambahan variasi marmer terhadap *fly ash* dan RHA, ditinjau dari angka kuat tekan dan porositasnya, adalah Mix 4 dengan variasi marmer sebesar 30%. Karena berdasarkan hasil penelitian menunjukkan kuat tekan dan diperoleh berturut-turut adalah sebesar 7,252 MPa dan 14,56%.
3. Keterkaitan antara kuat tekan dan porositas pada mortar adalah bersifat invers atau berbanding terbalik. Dengan meningkatnya kuat tekan yang dihasilkan, persentase porositas dalam mortar cenderung mengalami

penurunan yang signifikan. Penurunan nilai porositas ini mempresentasikan bahwa mortar mempunyai densitas yang lebih tinggi, sehingga mampu menahan tekanan yang lebih besar.

4. Semakin banyak penambahan variasi marmer, maka mengakibatkan peningkatan *setting time* pada pasta mortar. Hal ini disebabkan oleh tingginya kandungan Ca pada marmer karena semakin bertambahnya marmer, semakin tinggi kelarutan CaO yang menghasilkan panas. Hal ini berdampak pada penguapan air pada pasta yang menyebabkan mortar lebih cepat mengering.

SARAN

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk penambahan marmer di atas 30% atau rasio *fly ash* dan abu sekam padi yang berbeda.
2. *Sequence* dalam pembuatan mortar perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi *setting time* mortar geopolimer.

DAFTAR PUSTAKA

- Arizona, D., & Wardhono, A. (2020). "Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar Metode Wet Mixing Berbahan Dasar Abu Terbang Kapur Dan NaOH 14 M". *JURNAL REKAYASA TEKNIK SIPIL*, 8(1).
- ASTM C128 - 07 A. (2009). "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption".
- ASTM C191 - 08. (2008). "Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle".
- ASTM C 29/C 29M - 97. (2009). "Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate".
- ASTM C 642-06. (2006). "Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete".
- Badaron, St. F., Gecong, A., Anies, M. K., Meydinia, W., Achmad, A., & Setiani, E. P. (2019). "Studi Perbandingan Kuat Tarik Tidak Langsung terhadap Campuran Aspal Beton dengan menggunakan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi sebagai Filler" (Vol. 4, Issue 2). <https://ojs.unanda.ac.id/index.php/jiit/index>
- 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. <https://doi.org/10.46799/jsa.v2i4.218>
- Fitriahsari, B. N., & Wardhono, A. (2018). "Pengaruh Substitusi Fly Ash Dengan Limbah Marmer Terhadap Kuat Tekan Dan Porositas Beton Geopolimer Pada NaOH 15M".
- Gill, P., Rathanasalam, V. S., Jangra, P., Pham, T. M., & Ashish, D. K. (2024). "Mechanical and microstructural properties of fly ash-based engineered geopolymer mortar incorporating waste marble powder". *Energy, Ecology and Environment*, 9(2),

- 159–174. <https://doi.org/10.1007/s40974-023-00296-3>
- Khan, M. A., Ayub Khan, S., Khan, B., Shahzada, K., Althoey, F., & Deifalla, A. F. (2023). “Investigating the feasibility of producing sustainable and compatible binder using marble waste, fly ash, and rice husk ash: A comprehensive research for material characteristics and production”. *Results in Engineering*, 20. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101435>
- Luntungan, R. N., Sumajouw, M. D. J., & Pandaleke, R. E. (2019). “Optimalisasi Kuat Tekan Beton Geopolymer Dengan Menambahkan Semen Atau Kapur Pada Perawatan Temperatur Ruangan”. *Jurnal Sipil Statik*, 7(7), 749–756.
- Nuaklong, P., Wongsu, A., Sata, V., Boonserm, K., Sanjayan, J., & Chindaprasirt, P. (2019). “Properties of high-calcium and low-calcium fly ash combination geopolymer mortar containing recycled aggregate”. *Heliyon*, 5(9). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02513>
- Riyanto, E., Widyananto, E., & Renaldy, R. R. (2021). “Analisis Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Silica Fume dan Kapur Tohor” (Vol. 17, Issue 1).
- Setiawati, M., Sri Martini, R. A., & Nurulita, R. (2022). “Variasi Molaritas Naoh Dan Alkali Aktivator Beton” Geopolimer. *JURNAL DEFORMASI*, 7(1), 56–64.
- SNI 03-1974. (1990). SNI 03-1974 “Metode Pengujian Kuat Tekan Beton.” Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- SNI 1970 : 2016. (2016). SNI 1970 : 2016 “Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus.” Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- SNI 03-1968. (1990). SNI 03-1968 “Metode Pengujian Tentang Analisis Saringan Agregat Halus Dan Kasar.” Badan Standarisasi Nasional (BSN).
- Solikin, M. (2021). “Analysis of 1:1 Fly Ash and Slag Combination in Geopolymer Concrete Using Na₂SiO₃ and NaOH as Alkaline Activator: A Literature Study”. *Dinamika TEKNIK SIPIL*, 14(1), 13–20.
- Triantono, R. E., & Wardhono, A. (2019). “Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar Metode Wet Mixing Dengan Berbahan Dasar Abu Terbang Dan NaOH 8M”. *JURNAL REKAYASA TEKNIK SIPIL*, 7(3).
- Wijayanti, D. D. K., & Wardhono, A. (2021). “Pengaruh Substitusi Limbah Marmer Terhadap Nilai Kuat Tekan Dry Geopolymer Mortar Metode Wet Mixing Berbahan Dasar Abu Terbang Dan NaOH 12 M”. *JURNAL REKAYASA TEKNIK SIPIL*, 09(2).
- Zebua, D., & Sinulingga, K. (2018). “Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Sebagai Campuran Terhadap Kekuatan Batu Bata”. *JURNAL EINSTEIN*, 6(2), 8–13. <http://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/einstene-issn:2407-747x,p-issn2338-1981>