

Pengaruh Penambahan Kapur Pada Mortar Geopolimer Berbahan Dasar *Fly Ash* Dan Abu Sekam Padi Dengan NaOH 12 Molar

Feby Nirmalasari¹⁾, Arie Wardhono²⁾

¹⁾ Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya,
Surabaya, Indonesia

Email: febynirmalasari.21014@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya,
Surabaya, Indonesia

Received: 2025-01-01; Accepted: 2025-03-21; Published: 2025-05-20

Abstract

Indonesia, as a country with a large population and rapid economic growth, requires high quality infrastructure. Due to the increasing global population, climate change, resource scarcity, and demand for more efficient, innovation in construction material technology become crucial. One such innovation is the use of geopolymer mortar, which is environmentally friendly because it does not involve the use of cement. This study aims to determine the effect of lime on geopolymer mortar with fly ash and rice husk ash in 12 Molar NaOH on compressive strength, setting time, and porosity of the mortar, and to identify the optimal lime ratio. The experimental method uses cube samples with dimensions 5x5x5 cm³. The lime ratios used are 1%, 2.5%, 5%, and 7.5%, while the fly ash ratio is 0.8% and the rice husk ash ratio is 0.2%. The results indicate that higher lime ratios result in lower the compressive strength, higher porosity percentages, and faster the initial and final setting times. The optimal lime ratio is 1%, with a compressive strength of 7,568 MPa and the lowest porosity percentage of 17,894% at 28 days of age.

Keywords: Geopolymer; Fly Ash; Rice Husk Ash; Lime; Compressive Strength.

Abstrak

Indonesia, sebagai negara dengan populasi besar dan pertumbuhan ekonomi yang pesat, membutuhkan infrastruktur yang berkualitas. Seiring dengan peningkatan populasi global, perubahan iklim, dan kelangkaan sumber daya, inovasi dalam teknologi bahan konstruksi menjadi sangat penting. Salah satu inovasi tersebut adalah penggunaan mortar geopolimer, yang ramah lingkungan karena bersih dari penggunaan semen. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan kapur pada mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi dengan NaOH 12 Molar terhadap kuat tekan, *setting time*, dan porositas mortar, serta menentukan rasio kapur terbaik. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental dengan benda uji kubus 5x5x5 cm³. Rasio kapur yang digunakan adalah 1%, 2,5%, 5%, dan 7,5%, sedangkan rasio *fly ash* adalah 0,8% dan rasio abu sekam padi adalah 0,2%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio kapur, semakin rendah nilai kuat tekan yang dihasilkan, semakin besar persentase porositasnya, serta semakin cepat mencapai waktu pengikatan awal akhir. Rasio kapur terbaik adalah 1%, dengan nilai kuat tekan 7,568 MPa dan porositas terendah 17,894% pada usia 28 hari.

Kata Kunci: Geopolimer; *Fly Ash*; Abu Sekam Padi; Kapur; Kuat Tekan.

PENDAHULUAN

Sebagai negara dengan populasi yang besar dan pertumbuhan ekonomi yang cepat (Rostiana & Rodesbi, 2020), Indonesia memerlukan infrastruktur yang berkualitas. Seiring dengan peningkatan populasi global yang pesat, perubahan iklim, dan kelangkaan sumber daya, menjadi munculnya inovasi dalam teknologi bahan konstruksi. Salah satu inovasi dalam teknologi bahan konstruksi adalah penggunaan mortar geopolimer, yang merupakan material yang bersih dari penggunaan semen sehingga ramah lingkungan (Sulistyorini et al., 2023).

(Nurzamilov & Sitogasa, 2024) menyatakan bahwa semen menyebabkan pemanasan global meningkat. Hal itu disebabkan oleh pengeluaran gas karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄) dan dinitrogen monoksida (N₂O). Salah satu penyebab utama pemanasan global yaitu CO₂,

yang dapat diminimalisir dengan mengganti penggunaan semen pada mortar. Geopolimer dibuat dengan memanfaatkan campuran limbah industri sehingga dapat menggantikan semen. Bahan dasar utama mortar geopolimer adalah silika (Si) dan aluminium (Al), yang terdapat pada limbah yaitu *fly ash* dan abu sekam padi (RHA) (Budiningrum et al., 2021). Pengaplikasian mortar geopolimer ini dapat digunakan sebagai pengisi pasangan dinding dan juga berperan sebagai perekat antar batu belah (Wijaya et al., 2019).

Geopolimer dapat dibuat dari material yang memiliki kandungan Silika Oksida. *Fly ash*, yang dihasilkan dari pembakaran batu bara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), adalah salah satu bahan yang kaya akan mineral anorganik Silika Oksida (Winarno et al., 2019) dan seringkali dibiarkan menumpuk hingga jumlahnya

melimpah. Ketersediaan *fly ash* yang melimpah ini membuka peluang untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku geopolimer. Untuk melarutkan senyawa silika, digunakan aktivator alkali seperti sodium hidroksida (NaOH) yang berperan memecah senyawa silika pada *fly ash* (Budiningrum et al., 2021). Proses aktivasi tersebut akan membentuk polimer kuat yang disebut geopolimersasi.

Geopolimer dihasilkan melalui ikatan kimia bahan alami anorganik yang banyak mengandung senyawa silika oksida dan alumina, dengan bantuan NaOH dan Sodium Silikat. Abu sekam padi mengandung hingga 94,5% silika dari hasil pembakaran (Dafilullah et al., 2003). Hasil pembakaran tersebut menyebabkan struktur partikel menjadi berpori, sehingga banyak area permukaan abu yang dapat bereaksi dengan larutan alkali. Kandungan silika yang tinggi dan partikel yang sangat halus pada abu sekam padi dapat mempercepat proses reaksi polikondensasi, yaitu pembentukan ikatan polimer hingga menghasilkan massa padat yang disebut geopolimer. Ketersediaan abu sekam padi melimpah, terbukti dengan Indonesia merupakan salah satu produsen padi terbesar di dunia setiap tahunnya (Siahaan, 2024), sehingga abu sekam padi yang dibakar memungkinkan digunakan untuk memenuhi kebutuhan pengganti semen.

Kapur digunakan sebagai bahan mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash*, yang mengandung silika dan aluminium. Kapur bereaksi dengan cairan aktivator alkali untuk menghasilkan bahan pengikat seperti halnya dengan semen. Kapur memiliki partikel halus yang meningkatkan reaktivitasnya dengan cairan dalam campuran geopolimer, sehingga mempercepat proses reaksi pemadatan. Persediaan kapur sangat melimpah, dibuktikan dengan adanya sekitar 23,23 miliar ton cadangan batu kapur yang ada di provinsi Sumatera Barat pada tahun 2022 (Topmaterial.id, 2022), sehingga kapur dapat memenuhi kebutuhan penggunaan bahan geopolimer.

Kualitas dan kekuatan mortar geopolimer harus didasarkan pada hasil pengujian porositas dan kuat tekan. Uji kuat tekan dilakukan untuk mengetahui kemampuan mortar dalam menahan beban. Uji porositas dilakukan untuk mengetahui kepadatan material. Semakin tinggi porositas, maka kuat tekan semakin rendah karena rongga yang ada pada mortar dapat mengurangi kemampuan material untuk menahan beban tekan (Okarinda et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk meneliti pengaruh penambahan kapur pada mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi dengan NaOH 12 Molar terhadap nilai kuat tekan dan porositas. *Fly ash*, abu sekam padi, dan kapur digunakan sebagai bahan dasar mortar diharapkan dapat mengurangi efek emisi udara yang terpapar polusi akibat produksi semen. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai kuat tekan, waktu pengerasan (*setting time*), porositas mortar geopolimer, serta rasio kapur yang paling optimal.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan jenis eksperimen dengan pendekatan kuantitatif. Pengujian gradasi pasir, penyerapan air pada pasir, pembuatan benda uji, uji berat jenis, uji berat volume, uji *setting time*, uji kuat tekan, uji

porositas, dan perawatan benda dilakukan di Lab Bahan dan Beton Universitas Negeri Surabaya. Sedangkan pengujian XRF dilakukan di Lab Universitas Malang. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui pengaruh yang terjadi pada mortar geopolimer jika ada penambahan kapur rasio 1%, 2.5%, 5%, dan 7.5% melalui pengujian laboratorium. Data yang dihasilkan berupa angka. Untuk mempermudah penyusunan penelitian, dibutuhkan kerangka kerja yang jelas dan terstruktur mengenai langkah-langkah penyelesaiannya. Berikut merupakan kerangka kerja yang digunakan:

1. Persiapan alat dan bahan yang digunakan

Material yang diperlukan dalam penelitian ini untuk pembuatan benda uji, yaitu:

Tabel 1. Material Pembuatan Mortar

No	Material	Sumber
1.	<i>Fly Ash</i>	Malang
2.	Abu Sekam Padi	Ponorogo
3.	Kapur	Surabaya
4.	Sodium Hidroksida	Surabaya
5.	Sodium Silikat	Surabaya
6.	Air Suling	Surabaya
7.	Agregat Halus	Surabaya
8.	Pasir Lumajang	Surabaya

Sumber: Data Primer

Pelaksanaan penelitian membutuhkan peralatan yang memadai untuk memastikan hasil yang akurat. Berikut adalah peralatan yang digunakan pada penelitian ini:

Tabel 2. Peralatan Pembuatan Mortar

No.	Pengujian Propertis	Alat Yang Digunakan
1.	Uji Gradasi Pasir	1. Ayakan Mesh
		2. Mesin Pengayak
		3. Timbangan
		4. Cawan
2.	Uji Berat Volume	1. Timbangan
		2. Moulding
		3. Cetok
3.	Uji Berat Jenis	1. Timbangan
		2. Piknometer
		3. Oven Listrik
		4. Cetok
		5. Cawan
4.	Uji Penyerapan Air	1. Timbangan
		2. Cawan
		3. Oven Listrik
5.	Analisa Saringan	1. Ayakan Mesh
		2. Mesin Pengayak
		3. Timbangan
6.	Pembuatan Benda Uji	1. Penumbuk Mortar
		2. Moulding
		3. Wadah Mixer
		4. Bejana Enamel
		5. Spatula
		6. Gelas Ukur
		7. Oven Listrik
		8. Kuas
7.	Pengujian Beton	1. Timbangan
		2. Jangka Sorong
		3. Universal Testing Machine (UTM) WE-600B, 360V
		4. Vicat Test

Sumber: Data Primer

2. Pengujian Bahan

a. Uji berat volume

Pengujian berat volume bertujuan untuk menentukan perbandingan antara berat dan volume benda uji. Berdasarkan ASTM C29-C29M-97 (2009), berat volume agregat halus (pasir) harus berada dalam kisaran 1,6–1,9 gr/cm³. Uji berat volume dirumuskan dengan persamaan:

$$\text{Berat Volume} = \frac{W1-W2}{A} \quad (1)$$

Dimana:

- A = Volume moulding (cm³)
- W1 = Berat moulding dan benda uji (gram)
- W2 = Berat moulding (gram)

b. Uji berat jenis

Pengujian berat jenis penelitian ini dilakukan menggunakan standar SNI 1970-2008. Uji berat jenis dirumuskan dengan persamaan:

$$\text{Berat jenis massa kering (Sd)} = \frac{A}{S+B-C} \quad (2)$$

$$\text{Berat jenis SSD (Ss)} = \frac{S}{S+B-C} \quad (3)$$

$$\text{Berat jenis semu (Sa)} = \frac{A}{A+B-C} \quad (4)$$

$$\text{Berat jenis Pasir agregat halus} = \frac{Sd+Ss+Sa}{3} \quad (5)$$

$$\text{Berat jenis fly ash, abu sekam padi, dan kapur} = \frac{S}{S+B-C} \quad (6)$$

$$\text{Berat jenis NaOH 12 Molar dan sodium silikat} = \frac{W}{V} \quad (7)$$

Dimana:

- A = Berat benda uji dalam kondisi oven (gram)
- B = Berat piknometer dan aquades (gram)
- C = Berat piknometer, aquades, dan benda uji (gram)
- D = Berat benda uji dalam kondisi SSD (gram)
- W = Berat benda uji di dalam gelas ukur (gram)
- V = Volume gelas ukur (cm³)

3. Rasio mix design

Mix design yang akan digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari trial mix design. Penentuan mix design pada penelitian ini dilakukan melalui pengujian workability campuran mortar trial mix. Pada penelitian ini, digunakan 5 mix design. Mix design 1 digunakan sebagai kontrol. Berikut adalah komposisi mix design yang digunakan dalam penelitian ini:

Tabel 3. Rasio Mix Design

Mix	FA	RHA	KPR	PS	SH	SS	Air
1	0,8	0,2	0	2,75	0,13	0,39	0,395
2	0,8	0,2	0,010	2,75	0,13	0,39	0,395
3	0,8	0,2	0,025	2,75	0,13	0,39	0,395
4	0,8	0,2	0,050	2,75	0,13	0,39	0,395
5	0,8	0,2	0,075	2,75	0,13	0,39	0,395

Sumber: Data Primer

Dimana:

- FA = fly ash
- RHA = abu sekam padi
- KPR = kapur
- PS = pasir
- SH = sodium hidroksida
- SS = sodium silikat

4. Perawatan (curing) benda uji

Seluruh benda uji yang akan diuji porositas akan dilakukan curing pada suhu ruang dan dianginkan selama 24 jam.

5. Pengujian benda uji

a. Uji Kuat Tekan Mortar



Gambar 1. Universal Testing Machine (UTM)
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Pengujian kuat tekan mortar dalam penelitian ini dilakukan sesuai dengan standar SNI 03-1974-1990. Pengujian dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM). Benda uji yang akan diuji kuat tekan adalah mortar umur 7, 14, dan 28 hari setelah melalui proses curing pada suhu ruang. Nilai kuat tekan mortar dirumuskan dengan persamaan (SNI 03-1974-1990):

$$F'm = \frac{P}{A} \quad (8)$$

Dimana:

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

b. Uji Porositas Mortar

Mortar pada penelitian ini diuji porositas. Pengujian porositas ini dilakukan berdasarkan standar ASTM C-642-06 (2006). Porositas mortar dirumuskan dengan persamaan (ASTM C- 642-06(2006)):

$$n = \frac{C-A}{C-D} \times 100\% \quad (9)$$

Dimana:

- n = Nilai porositas mortar (%)
- A = Berat mortar dalam kondisi kering oven (g)
- C = Berat mortar dalam kondisi jenuh kering permukaan (g)
- D = Berat mortar dalam air (g)

c. Pengujian Setting Time



Gambar 2. Vicat Test
Sumber: Dokumentasi Pribadi

Uji setting time dalam penelitian ini untuk menentukan durasi yang diperlukan agar mortar menghasilkan campuran yang mengikat dengan efektif. Berdasarkan ASTM C-191, waktu ikat awal semen yang diuji minimal 45 menit, sementara waktu ikat akhirnya tidak boleh lebih melebihi 375 menit. Pengujian setting time dilakukan dengan pengamatan penurunan benda uji setiap 15 menit.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini digunakan untuk memahami bagaimana pengaruh penambahan kapur pada mortar geopolimer yang menggunakan *fly ash* dan abu sekam padi sebagai bahan dasar dengan NaOH 12 Molar dapat mempengaruhi sifat mortar. Untuk memperoleh hasil penelitian yang akurat, dilakukan pengujian terhadap bahan penyusun, serta memaparkan mengenai kondisi campuran dan benda uji beserta hasil pengujiannya. Berikut adalah penelitian yang dilakukan:

Hasil Uji Material

a. Agregat Halus

Pasir pada mortar digunakan sebagai pengisi rongga. Sifat-sifat pasir dapat mempengaruhi kekuatan dan kemampuan dalam menyerap air (Prabowo & Sofia, 2024). Oleh karena itu, diperlukan pengujian untuk bahan pasir yang digunakan. Pengujian bahan pada pasir mencakup uji gradasi pasir, uji berat volume, dan uji berat jenis.

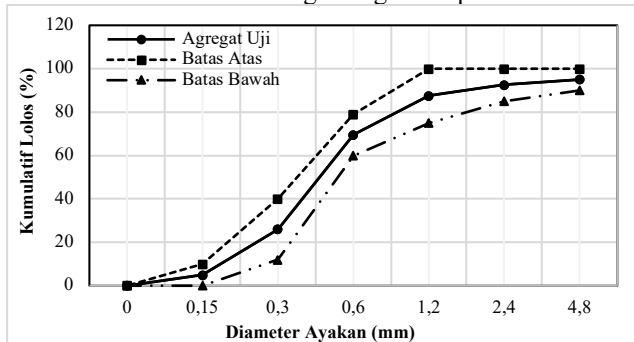
Pengujian gradasi pasir dilakukan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel pasir yang digunakan dalam pembuatan mortar geopolimer. Pasir yang digunakan dalam penelitian ini yaitu Pasir Lumajang. Pada uji gradasi pasir, nilai *fineness modulus* yang diperoleh berdasarkan Tabel 4 adalah $224,5:100 = 2,245\%$.

Tabel 4. Gradasi Pasir

No (mm)	Berat Tertahan (%)	Berat Tertahan Kumulatif (%)	Berat Lolos Kumulatif (%)	Batas Atas	Batas Bawah
4	5	5	95	100	90
8	2,5	7,5	92,5	100	85
16	5	12,5	87,5	100	75
30	18	30,5	69,5	79	60
50	43,5	74	26	40	12
100	21	95	5	10	0
Pan	5	0	0	0	0
Total	1000	100	224,5		

Sumber: Data Primer

Berdasarkan SNI 03-2834-2000, Pasir Lumajang termasuk dalam zona 3 dengan klasifikasi pasir agak halus. Hasil uji gradasi pasir sesuai dengan zona pasir yang dibutuhkan. Berikut adalah grafik gradasi pasir:



Gambar 3. Grafik Gradasi Pasir
Sumber: Data Primer

Uji berat volume dilakukan untuk menentukan berat volume prekursor (Alfarisi & Diana, 2024). Nilai yang didapat dari perhitungan berat volume Pasir Lumajang pada penelitian ini adalah $(10,548-8,849):1 = 1,669 \text{ gr/cm}^3$. Pengujian berat volume pasir telah memenuhi syarat

pengujian sesuai ASTM C29/C29M-97 (2009). Uji berat volume yang digunakan sebagai campuran pengisi mortar umumnya memiliki berat volume antara $1,6-1,9 \text{ gr/cm}^3$, yang berarti Pasir Lumajang yang digunakan sudah sesuai.

Sedangkan nilai uji berat jenis Pasir Lumajang yang digunakan adalah $2,517 \text{ gr/cm}^3$. Pengujian berat jenis telah memenuhi syarat pengujian sesuai ASTM C128-07A (2009) mengenai uji berat volume agregat halus dilakukan dalam keadaan kering. Uji berat jenis umumnya berada dalam rentang $1,6 - 3,2 \text{ gr/cm}^3$, yang berarti berat jenis Pasir Lumajang yang digunakan sudah sesuai.

b. *Fly ash*

Pada penelitian ini, *Fly ash* digunakan sebagai substitusi semen untuk membuat geopolimer pada mortar. Oleh karena itu, diperlukan pengujian terhadap bahan tersebut. Pengujian yang dilakukan pada *fly ash* meliputi uji berat volume, yang hasilnya adalah $(9,044-7,585):1 = 1,459 \text{ gr/cm}^3$, dan uji berat jenis *fly ash*, yang hasilnya adalah $250:(250+625-780) = 2,632 \text{ gr/cm}^3$. Sementara itu, hasil pengujian XRF dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Uji XRF *Fly Ash*

Komponen	(%)	Oksida	(%)
Al	7,30%	Al ₂ O ₃	10%
Si	17,40%	Si ₂ O	26,60%
K	1,92%	K ₂ O	1,52%
Ca	25,80%	CaO	22,90%
Ti	1,30%	TiO ₂	1,34%
Fe	41,80%	Fe ₂ O ₃	33,80%
Mn	0,40%	MnO	0,28%

Sumber: Data Primer

Berdasarkan hasil pengujian XRF yang terdapat dalam tabel 5, komposisi utama dalam *fly ash* adalah Fe (besi) dengan persentase 41,8%, diikuti oleh Ca (kapur) sebesar 25,80%, Si sebanyak 17,4%, dan Al dengan jumlah 7,3%. Dengan demikian, *fly ash* termasuk dalam kelas C, karena total kandungan Fe₂O₃ + SiO₂ + Al₂O₃ ($33,8\%+26,6\%+10\% = 70,4\%$) lebih dari 50% dan kandungan CaO mencapai 22,9% yang lebih dari 10%, berarti sesuai dengan ASTM C168.

c. Abu Sekam Padi

Pada penelitian ini, abu sekam padi dimanfaatkan sebagai pengganti semen dalam pembuatan geopolimer pada mortar. Pengujian pada RHA meliputi uji berat volume, yang hasilnya adalah $(9,112-8,849):1 = 0,263 \text{ gr/cm}^3$. Sementara itu, hasil uji XRF dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Hasil Uji XRF RHA

Komponen	(%)	Oksida	(%)
Si	81,10%	Si ₂ O	92,10%
K	13,50%	K ₂ O	5,65%
Ca	3,23%	CaO	1,40%
Mn	0,74%	MnO	0,29%
Fe	1,04%	Fe ₂ O ₃	0,447%

Sumber: Data Primer

Dari hasil pengujian XRF pada tabel 6, menunjukkan bahwa kandungan utama dalam *fly ash* adalah Si dengan jumlah 81,1%, sedangkan bentuk oksidanya memiliki persentase 92,%. Kandungan silika yang tinggi dan partikel yang sangat halus pada abu sekam padi dapat mempercepat proses pemadatan pada mortar.

d. Kapur

Pada penelitian ini, kapur digunakan sebagai bahan pengganti semen dalam pembuatan geopolimer pada mortar. Oleh karena itu, dilakukan pengujian terhadap bahan tersebut. Pengujian yang dilakukan pada kapur meliputi uji berat volume, dengan hasil sebesar $(8,148-7,682):1 = 0,466 \text{ gr/cm}^3$, dan uji berat jenis kapur, dengan hasil sebesar $125:(125+625+685) = 1,923 \text{ gr/cm}^3$. Berdasarkan perhitungan, berat jenis ini memenuhi syarat ASTM C128-07A (2009), yaitu berada dalam rentang $1,6 - 3,2 \text{ gr/cm}^3$.

e. Sodium Silikat (Na_2SiO_3)

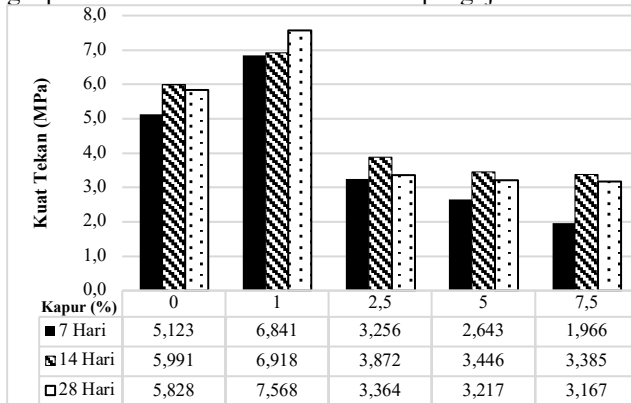
Sodium silikat pada mortar geopolimer digunakan untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Pengujian bahan yang dilakukan pada sodium silikat adalah uji berat jenis. Hasil pengujian tersebut digunakan untuk menghitung kebutuhan sodium silikat dan rasio W/S. Hasil uji berat jenis sodium silikat berdasarkan rumus (7) adalah $754:500 = 1,508 \text{ gr/cm}^3$.

f. Sodium Hidroksida (NaOH)

NaOH pada mortar geopolimer digunakan untuk mereaksikan silika dan alumina. Pengujian bahan yang dilakukan pada NaOH adalah uji berat jenis. Hasil uji ini digunakan untuk menghitung kebutuhan NaOH dan rasio W/S air. Hasil uji berat jenis sodium hidroksida 12 Molar berdasarkan rumus (7) adalah $638:500 = 1,276 \text{ gr/cm}^3$.

Analisa hubungan kuat tekan dan Usia mortar geopolimer

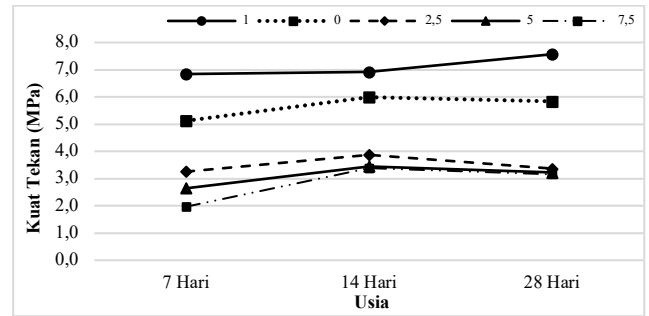
Uji kuat tekan benda uji dilakukan pada usia 7, 14, dan 28 hari. Analisis ini bertujuan untuk menentukan pengaruh umur benda uji terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Berikut adalah hasil pengujian tersebut:



Gambar 4. Grafik Rata-Rata Kuat Tekan
Sumber: Data Primer

Total terdapat 5 *mix design* yang diuji, masing-masing dengan 9 benda uji. Gambar 5 menggambarkan hubungan antara kuat tekan dan umur mortar geopolimer untuk setiap *mix design*:

Kapur (%):

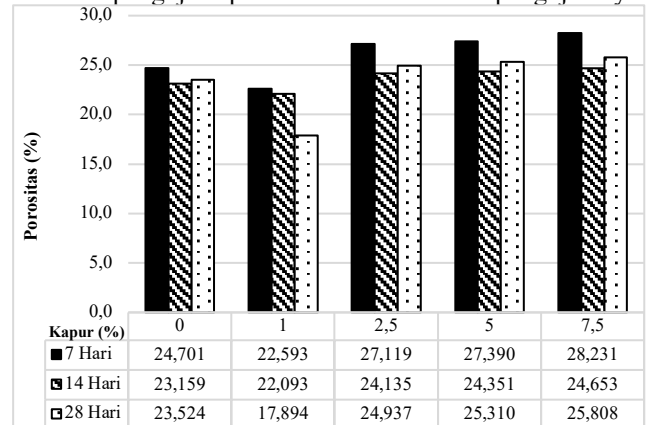


Gambar 5. Hubungan Kuat Tekan Dan Umur Mortar
Sumber: Data Primer

Pada grafik hubungan antara kuat tekan dan usia mortar geopolimer untuk setiap variasi *mix design*, rasio penambahan kapur sebesar 1% menunjukkan nilai kuat tekan tertinggi yang stabil dari 7 hari hingga 14 hari, dan kemudian meningkat lebih lanjut pada 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kapur sebesar 1% adalah komposisi optimal untuk mencapai kuat tekan terbaik. Pernyataan ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Maryentry et al. (2024), yang menunjukkan bahwa nilai kuat tertinggi dengan penambahan kapur pada umur 28 hari mencapai optimal pada persentase 1%. Namun, rasio penambahan kapur 2.5%, 5%, dan 7.5% menunjukkan peningkatan kuat tekan dari 7 hari hingga 14 hari, tetapi kemudian nilai tersebut menurun sedikit pada 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa mortar dengan rasio kapur tersebut tidak mempertahankan kuat tekannya dengan baik dalam jangka panjang.

Analisa Hubungan Kuat Tekan dan Porositas

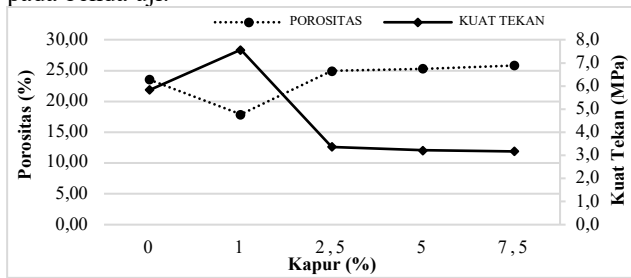
Pengujian porositas dilakukan pada benda uji usia 7, 14, dan 28 hari. Sebelum pengujian, benda uji melalui proses *curing* dengan direndam dalam air sehari sebelum pengujian porositas. Berikut hasil pengujiannya:



Gambar 6. Grafik Porositas
Sumber: Data Primer

Berdasarkan Gambar 6, grafik menunjukkan bahwa pada usia 7 hingga 14 hari, nilai porositas cenderung menurun. Namun, pada usia 28 hari, nilai porositas meningkat kembali, kecuali pada *mix design* 2 dimana benda uji mortar menjadi lebih padat. Setiap variasi *mix design* diuji menggunakan 6 benda uji. Grafik berikut

menampilkan hubungan antara kuat tekan dan porositas pada benda uji.

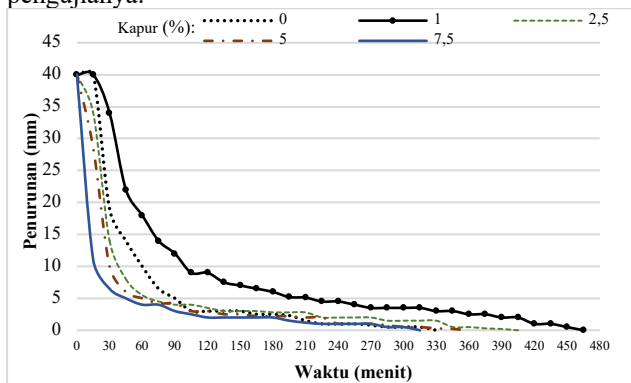


Gambar 7. Hubungan Kuat Tekan Dan Porositas
 Sumber: Data Primer

Berdasarkan grafik 7 menunjukkan hubungan antara kuat tekan dan porositas pada usia 28 hari, terlihat bahwa ada hubungan terbalik antara kedua variabel tersebut. Pada rasio penambahan kapur 1%, nilai porositas terendah adalah 17,89% dengan kuat tekan tertinggi yaitu 7,568 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa mortar dengan porositas yang lebih rendah memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada rasio penambahan kapur 7,5%, nilai porositas tertinggi adalah 25,81% dengan kuat tekan terendah yaitu 3,1687 MPa. Hal tersebut sesuai dengan penelitian (Aisyah, 2024) bahwa mortar dengan porositas yang lebih tinggi cenderung memiliki kekuatan tekan yang lebih rendah. Ini berarti bahwa semakin banyak rongga dalam mortar, semakin rendah kekuatan tekan yang dapat dicapai. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kandungan kapur dapat meningkatkan nilai porositas pada mortar.

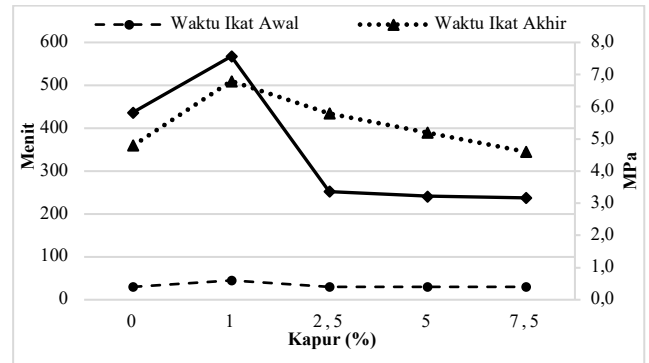
Analisa Hubungan Kuat Tekan dan Setting Time

Penentuan waktu pengikatan dilakukan pada seluruh benda uji dalam berbagai *mix design*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui dampak penambahan kapur dengan rasio 1%, 2.5%, 5%, dan 7.5%. Berikut hasil pengujianya:



Gambar 8. Grafik Setting Time
 Sumber: Data Primer

Dari gambar 8, waktu ikat akhir tercepat pada persentase 7,5% dan waktu ikat akhir terlama pada kapur persentase 1% melewati menit ke 465 menit. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan kapur berpengaruh pada variasi waktu ikat. Adapun grafik hubungan kuat dan waktu ikat disajikan pada gambar berikut:



Gambar 9. Hubungan Kuat Tekan dan Setting Time
 Sumber: Data Primer

Pengikatan pasta geopolimer berdasarkan grafik hubungan kuat tekan dan *setting time* menunjukkan bahwa waktu ikat relatif konstan dengan sedikit penurunan saat persentase kapur meningkat. Waktu ikat akhir mengalami peningkatan tertinggi pada penambahan kapur 1% yaitu selama 465 menit, kemudian menurun seiring dengan peningkatan persentase kapur. Hal ini menunjukkan bahwa ada batas untuk penambahan kapur dalam memperpanjang waktu ikat akhir dan peningkatan kuat tekan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengaruh penambahan kapur pada mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi dengan NaOH 12 Molar menunjukkan semakin tinggi rasio kapur, semakin rendah nilai kuat tekan yang dihasilkan. Penambahan kapur sebesar 7,5% menghasilkan nilai kuat tekan terendah dibanding rasio kapur lainnya, yaitu 1,966 MPa pada usia 7 hari. Penambahan kapur sebesar 1% menghasilkan nilai kuat tekan tertinggi dibandingkan rasio kapur lainnya, yaitu 7,568 Mpa pada usia 28 hari.

Pengaruh penambahan kapur pada mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi dengan NaOH 12 Molar menunjukkan bahwa semakin tinggi rasio kapur, semakin besar persentase porositas yang dihasilkan. Persentase porositas terbesar pada penelitian ini diperoleh dari mortar geopolimer dengan rasio kapur 7,5% pada usia 7 hari, yaitu 28,231%. Sedangkan persentase porositas terkecil didapat dari mortar geopolimer dengan rasio kapur 1%, yaitu 17,894% pada usia 28 hari.

Waktu pengikat (*setting time*) dengan penambahan kapur pada mortar geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi dengan NaOH 12 Molar menunjukkan bahwa semakin tinggi persentase kapur yang ditambahkan, semakin cepat waktu ikat awal (*initial set*) dan waktu ikat akhir (*final set*) tercapai. Hal tersebut sesuai dengan penelitian Maryententry et al. (2024) *Setting time* tercepat terjadi pada penambahan kapur 7,5% dengan total *setting time* 315 menit atau dalam waktu 5,25 jam.

Rasio kapur terbaik untuk mortar geopolimer dengan *fly ash* dan RHA pada NaOH 12 Molar adalah 1%. Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, rasio penambahan kapur sebesar 1% menghasilkan nilai

kuat tertinggi pada usia 28 hari yaitu 7,568 Mpa dan persentase porositas terendah yaitu 17,894.

Saran yang dapat penulis sampaikan adalah, *uji trial mmix design* sebaiknya ditentukan *workability* dan kuat tekan pada usia 7 hari untuk memperoleh komposisi material *mix design* yang optimal. Selain itu, saat mengaduk adonan mortar, penting untuk memastikan bahwa mortar tercampur merata guna menghindari hasil benda uji keropos pada mortar geopolimer.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah, A. (2024). Pengaruh Water Solid Ratio (W/S) Pada Mortar Geopolimer Berbasis Kaolin Dan Kapur Dengan Molaritas Naoh 8 M. Skripsi, Fakultas Teknik Universitas Negeri Surabaya
- Alfarisi, B. R., & Diana, A. I. N. (2024). "Penggunaan Abu Tempurung Kelapa dan Kapur Hidrolis Sebagai Bahan Pengganti Semen pada Mortar Geopolimer". *Ge-STRAM*, Vol. 07, No. 2, September 2024.
- ASTM International. (2006). ASTM C 642-06 Standard Test Method for Density , Absorption , and Voids in Hardened Concrete. United States.
- ASTM International. (2009). ASTM C 29/C 29M - 97 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. United States.
- ASTM International (1992). ASTM C 191C Standard test methods for time of setting of hydraulic cement. United States.
- ASTM International. (2009). ASTM C128 - 07 A Standard Test Method for Density , Relative Density (Specific Gravity), and Absorption. United States.
- ASTM International. (2016). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use (Patent No. C168-19). United States
- Budiningrum, D. S., Kustirini, A., Purnijanto, B., Mahasukma, D., & Utama, T. Y. (2021). Studi Experimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Pltu Tanjungjati B Jepara. *Bangun Rekaprima*, 7(2).
- Dafilullah, A. A. ., Girgis, B. ., & Gad, H. M. . (2003). *Utilization Of Agro-Residues (Rice Husk) In Small Waste Water Treatment Plans*. 57(11), 1723–1731.
- Maryentry, E., Firdaus, F., & Prawira, W. Y. (2024). Pengaruh Penambahan Kapur Pada Semen Geopolimer Terhadap Mortar Geopolimer. *Rang Teknik Journal*, 7(1).
- Nurzamilov, A. M. R., & Sitogasa, P. S. A. (2024). Analisis Dampak Industri Semen Menggunakan Metode Life Cycle Assessment (LCA) Pada PT. Semen Z. *Globe: Publikasi Ilmu Teknik, Teknologi Kebumihan, Ilmu Perkapalan*, 2(1), 62–77.
- Okarinda, S. R., Wijaya, R. A. E., & Putra, B. P. (2022). Analisis Pengaruh Porositas Terhadap Uji Kuat Tekan Uniaksial Pada Batulempung di Desa Srimulyo Piyungan Yogyakarta. *Jurnal Teknologi Mineral Ft Unmul*, 10(2), 33–37.
- Prabowo, A. R., & Sofia, D. A. (2024). Analisis Pengaruh Jenis Pasir Sebagai Agregat Halus Terhadap Kuat Tekan Beton. *Akselerasi*, 6(1).
- Rostiana, E., & Rodesbi, A. (2020). Transisi Demografi dan Pertumbuhan Ekonomi Indonesia. *Jurnal Economia*, 16(1), 1–17.
- Siahaan, M. (2024). *Volume Of Rice Produced In Indonesia 2018-2023*. Statista.
- Sulistiyorini, D., Galuh, D. L. C., Prayogi, Y. O., Ardiansyah, M. T., & Hakim, A. R. (2023). Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer Molaritas Rendah Dengan Variasi Alkali Aktivator 1,5 Dan 2,5. *Bangun Rekaprima*, 9(1). <https://doi.org/10.32497/bangunrekaprima.v9i1.4603>
- Topmaterial.id. (2022). *Jenis, Fungsi dan Daerah Penghasil Batu Kapur di Indonesia*. Topmaterial.Id. <https://topmaterial.id/daerah-penghasil-batu-kapur/?form=MG0AV3>
- Wijaya, M. F., Olivia, M., & Saputra, E. (2019). Kuat Tekan Mortar Geopolimer Abu Terbang Hybrid menggunakan Semen Portland. *Jurnal Teknik*, 13(1), 61–69.
- Winarno, H., Muhammad, D., Ahsyar, R., & Wibowo, Y. G. (2019). Pemanfaatan Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash Dari Pltu Sumsel-5 Sebagai Bahan Utama Pembuatan Paving Block. *Jurnal Teknika*, 11(1).