

ANALISIS PENGARUH SUBSTITUSI *FLY ASH* DENGAN MATERIAL LIMBAH CANGKANG KERANG DAN SEMEN TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER

Roger Einstein^{1*}, Bimo B. Adhitya² dan Budi Nayobi³

¹Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

²Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

³Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: rogereinstein03@gmail.com

ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh substitusi semen dan limbah cangkang kerang terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Pemanfaatan limbah cangkang yang kaya CaO sebagai substitusi abu terbang dan semen diharapkan dapat meningkatkan keberlanjutan dan efisiensi material dalam bahan konstruksi. Metodologi yang digunakan bersifat eksperimental, dengan variasi proporsi material, termasuk tingkat substitusi abu terbang sebesar 10–30% dan penambahan semen sebesar 5–10%. Uji kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, dan 28 hari mengikuti standar ASTM C109, beserta analisis mikrostruktur untuk memahami interaksi antar material. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi optimal, yang menghasilkan kekuatan tertinggi, adalah 60% abu terbang, 30% limbah cangkang, dan 10% semen, dengan kuat tekan 41,28 MPa pada umur 28 hari. Penelitian ini mendukung pembangunan berkelanjutan dengan menghargai limbah industri, mengurangi ketergantungan pada semen tradisional, dan memajukan bahan konstruksi yang ramah lingkungan.

Kata Kunci: mortar geopolimer, limbah cangkang, abu terbang, kuat tekan, konstruksi berkelanjutan.

ABSTRACT: This study aims to analyze the effect of substituting cement and shell waste from mollusks on the compressive strength of geopolimer mortar. The utilization of shell waste rich in CaO as a substitute for fly ash and cement is expected to enhance sustainability and material efficiency in construction materials. The methodology employed is experimental, with variations in material proportions, including fly ash substitution levels of 10–30% and cement addition of 5–10%. Compressive strength tests are conducted at ages 3, 7, and 28 days following ASTM C109 standards, along with microstructural analysis to understand the interactions among the materials. Results indicate that the optimal combination, achieving the highest strength, is 60% fly ash, 30% shell waste, and 10% cement, with a compressive strength of 41.28 MPa at 28 days. This research supports sustainable development by valorizing industrial waste, reducing reliance on traditional cement, and advancing eco-friendly construction materials.

Keywords: geopolimer mortar, shell waste, fly ash, compressive strength, sustainable construction.

1. PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, geopolimer mulai dikenal sebagai alternatif yang menjanjikan terhadap semen Portland karena lebih ramah lingkungan. Material ini terbentuk dari reaksi alkali dengan silikat dan alumina, menghasilkan produk yang tahan terhadap suhu tinggi serta bahan kimia agresif. Kesadaran global atas dampak lingkungan dari industri semen semakin mendorong pencarian bahan bangunan berkelanjutan, salah satunya adalah geopolimer (Davidovits, 2015). Penelitian ini mengkaji pemanfaatan limbah cangkang kerang yang kaya akan kalsium oksida (CaO) dan sedikit semen sebagai substitusi *fly ash* dalam mortar geopolimer.

Fly ash merupakan limbah hasil pembakaran batu bara dan selama ini banyak digunakan sebagai bahan utama geopolimer karena ketersediaannya yang melimpah. Namun, menurut Peraturan Pemerintah No. 85 Tahun 1999, *fly ash* termasuk limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3) sehingga penggunaannya perlu ditinjau ulang agar tidak menambah beban pencemaran lingkungan (ASTM C618, 1994).

Semen menjadi penyumbang besar emisi karbon dioksida global, dengan kontribusi sekitar 8% dari total emisi. Produksi setiap satu ton semen menghasilkan sekitar satu ton CO₂, sehingga menjadi penyebab signifikan dalam perubahan iklim (Scrivener et al., 2016). Oleh karena itu, pengembangan bahan konstruksi alternatif seperti

geopolymer sangat penting untuk mengurangi jejak karbon.

Limbah cangkang kerang dari industri makanan laut belum banyak dimanfaatkan padahal mengandung CaCO_3 tinggi yang dapat dikalsinasi menjadi CaO . Kandungan senyawa seperti kapur, silika, dan alumina bersifat pozzolanic, menjadikan limbah ini berpotensi sebagai bahan penguat dalam mortar geopolymer (Siregar, 2009). Kalsinasi limbah cangkang kerang menghasilkan CaO yang mampu memperkuat matriks geopolymer dan meningkatkan kekuatan tekan (Freizna S. R., 2017).

Penelitian sebelumnya membuktikan bahwa penambahan CaO dari limbah seperti cangkang kerang dapat meningkatkan performa mekanik geopolimer, membuatnya kompetitif dengan mortar berbasis semen konvensional (Palomo et al., 2014). Oleh sebab itu, penelitian ini juga menambahkan sedikit semen untuk melihat dampaknya terhadap *high early strength* mortar, mengingat kuat tekan awal pada geopolimer murni dari *fly ash* belum optimal.

Kuat tekan adalah indikator utama untuk menilai performa mortar. Nilai kuat tekan tinggi menunjukkan kemampuan menopang beban serta ketahanan yang lebih lama dalam penggunaan jangka panjang. Maka dari itu, penelitian ini akan fokus pada pengaruh substitusi *fly ash* dengan limbah cangkang kerang dan semen terhadap kuat tekan mortar geopolimer (Bakharev, 2015).

Metodologi yang digunakan adalah eksperimen laboratorium dengan variasi komposisi bahan dan pengujian kuat tekan sesuai standar ASTM C109. Analisis mikrostruktur juga dilakukan menggunakan uji XRF dan XRD untuk mengetahui kandungan unsur serta struktur kristal bahan.

Secara umum, penelitian ini sangat relevan dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Dengan memanfaatkan limbah dan mengurangi ketergantungan pada semen, formulasi mortar geopolimer ini diharapkan tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga menjadi solusi dalam pengelolaan limbah industri (Zhang et al., 2019). Kajian ini berpotensi memberikan rekomendasi praktis untuk aplikasi konstruksi dan menjadi dasar bagi penelitian lanjutan mengenai material alternatif yang efisien dan berkelanjutan.

2. METODE

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Struktur, Konstruksi, dan Material Universitas Sriwijaya. Langkah pertama dalam penelitian

ini adalah melakukan uji karakteristik *fly ash* dari PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang sebagai bahan utama dalam pembuatan mortar geopolimer. Ada tiga metode pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik *fly ash*, yaitu *X-ray Diffraction* (XRD) untuk mengidentifikasi fase mineralogi dan struktur kristal, *X-ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia unsur penyusun, serta *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi dan struktur permukaan partikel. Dari hasil ketiga metode ini, *fly ash* akan dievaluasi kelayakannya sebagai prekursor dalam sistem geopolimer, khususnya dalam kandungan aluminosilikat dan ukuran partikel.

Pengujian ini menggunakan benda uji berbentuk kubus dengan dimensi 5x5x5 cm dengan proporsi campuran yang digunakan mengacu pada hasil studi dan penelitian-penelitian sebelumnya.

Dalam menyusun perencanaan campuran mortar (*Job Mix Design*) disesuaikan dengan penelitian-penelitian terdahulu. Bahan utama yang digunakan adalah *fly ash* sebagai binder, agregat halus, serta larutan alkali aktivator (NaOH 14 M dan Na_2SiO_3 dengan rasio 2:5). Proses pembuatan mortar dimulai dari persiapan dan penimbangan material, pencampuran menggunakan *concrete mixer*, pengecoran ke dalam cetakan silinder, pemadatan bertahap, kemudian dilakukan *curing* dalam oven pada suhu 90°C selama 24 jam dan dilanjutkan dengan *wrap curing*. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) pada usia mortar 3, 7, dan 28 hari untuk mengevaluasi pengaruh kombinasi rasio flyash, cangkang keras, dan semen terhadap sifat mekanik mortar geopolimer. *Job Mix Design* (JMD) untuk tiga sampel benda uji dapat dilihat pada Tabel 1.

Dalam penyusunan *Job mix Design* (JMD) mortar geopolimer dalam penelitian ini disusun berdasarkan penyesuaian antara proporsi campuran terhadap ukuran benda uji yang digunakan. Penyesuaian ini dilakukan agar jumlah dan susunan bahan material sesuai dengan kebutuhan cetakan kubus 5x5x5 cm, sehingga hasil pengujian kuat tekan dapat menggambarkan kinerja campuran dengan tepat.

Tabel 1. Job Mix Design (JMD)

Label	Sand (gr)	Binder (FA/AA)					
		Prekursor			Alkali Aktivator (Na ₂ SiO ₃ /NaOH 3)		
		<i>Fly ash</i> (gr)	Cangkang Kerang (gr)	Cement (gr)	NaOH (Mol)	NaOH (gr)	Na ₂ SiO ₃ (gr)
A	270	1800	-	-	14	225	675
B	270	1620	180	-	14	225	675
C	270	1440	540	-	14	225	675
D	270	1260	900	-	14	225	675
B2	270	1530	180	90	14	225	675
C2	270	1350	360	90	14	225	675
D2	270	1170	540	90	14	225	675
B3	270	1440	180	180	14	225	675
C3	270	1260	360	180	14	225	675
D3	270	1080	540	180	14	225	675

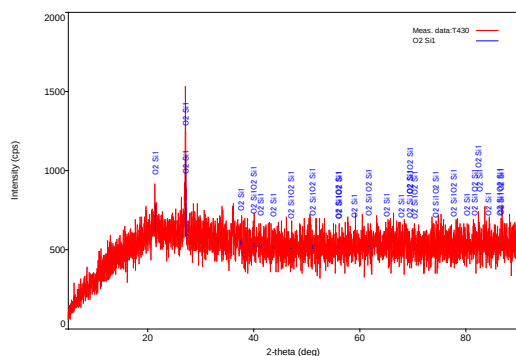
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian Fly Ash

Dalam penelitian ini digunakan *fly ash* dari PT. Pupuk Sriwidjaja (Pusri) dengan melakukan uji karakteristik *fly ash* dari metode XRF, XRD, dan SEM.

a. Pengujian X-Ray Diffraction (XRD)

Pengujian XRD bertujuan untuk menemukan dan mengidentifikasi fase-fase kristal yang terdapat dalam *fly ash*. Adapun hasil pengujian XRD dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Hasil pengujian XRD

Metode ini melibatkan penggunaan sinar X-Ray dengan tegangan 40 kV dan arus 10 mA, serta menggerakkan sampel pada kecepatan 10°/menit dengan sudut difraksi sebesar 2θ dalam rentang sudut antara 5 hingga 90 derajat. Pada hasil XRD menunjukkan bahwa puncak dengan intensitas tertinggi sebesar 1533,33 cps yang terletak pada sudut 2θ sebesar 27,14°. Fase kristal paling tinggi pada *fly ash* yang digunakan adalah kristal SiO₂, sehingga *fly ash* memiliki kandungan SiO₂ yang paling tinggi. Dengan menggunakan *software*

OriginPro®8.5, didapatkan presentase fase kristalin sebesar 2,83%, sedangkan fase amorf mencapai 97,17%.

b. Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF)

Pengujian X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui komposisi senyawa kimia dari *fly ash* dan mengklasifikasikan jenis *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini. Sesuai dengan ASTM C618-2019, kelas F adalah kategori *fly ash* yang memiliki kandungan senyawa kimia dengan jumlah SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃ memiliki nilai minimal 50%, kandungan CaO maksimal 18%, dan kandungan SO₃ maksimal 5% [7]. Adapun hasil pengujian XRF dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3.

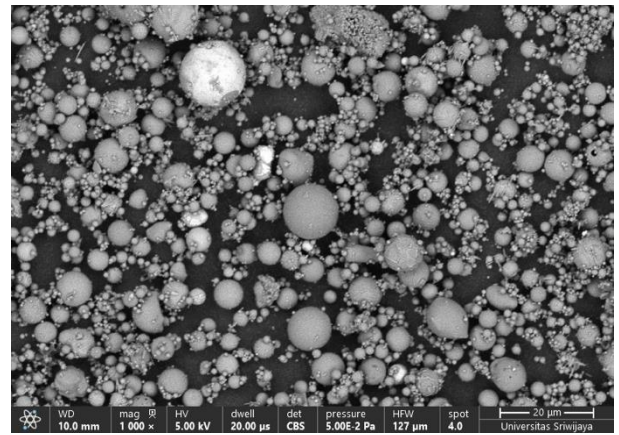
Tabel 2. Hasil Pengujian XRF

Komposisi Kimia	Jumlah (%)
SiO ₂	50.513
Al ₂ O ₃	22.944
Fe ₂ O ₃	11.298
CaO	4.927
Na ₂ O	4.472
MgO	1.853
SO ₃	1.526
K ₂ O	1.369
TiO ₂	0.837
P ₂ O ₅	0.174
Mn ₃ O ₄	0.070

SiO₂ (silikon dioksida) berfungsi sebagai sumber silikat yang, bersama dengan Al₂O₃ (aluminium oksida), akan membentuk jaringan tiga dimensi aluminosilikat saat direaksikan dengan aktivator alkali. Al₂O₃ sendiri sangat penting untuk kestabilan termal dan kekuatan

struktural geopolimer. Fe_2O_3 (besi oksida) juga berperan dalam memperkuat struktur ikatan dan dapat memberikan kontribusi tambahan terhadap ketahanan kimia maupun warna dari produk akhir. Sementara itu, kandungan CaO (kalsium oksida) harus dikendalikan, dengan batas maksimal 18%, karena keberadaan CaO dalam jumlah tinggi dapat mengarahkan reaksi menuju pembentukan produk hidrat seperti C-S-H (Calcium Silikat Hidrat) yang umum ditemukan pada semen Portland, bukan gel N-A-S-H (Natrium-Aluminium-Silikat-Hidrat) yang menjadi ciri khas geopolimer. Hal ini bisa mengurangi kestabilan jangka panjang dan mengubah sifat dari material geopolimer itu sendiri. Kandungan SO_3 (sulfur trioksida) juga dibatasi maksimal 5% karena dalam jumlah tinggi dapat menyebabkan ekspansi yang berlebihan, keretakan, dan menurunkan durabilitas material.

- c. Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM)
 Pengujian *Scanning Electron Microscope* (SEM) bermaksud menampilkan struktur butiran *fly ash*. Adapun hasil pengujian SEM dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Hasil pengujian SEM menunjukkan bahwa butiran *fly ash* umumnya berbentuk bulat, seperti yang terlihat pada Gambar 4.2 dengan pembesaran 1.000x. Bentuk butiran *fly ash* yang bulat memudahkan *fly ash* untuk bereaksi dengan senyawa lain selama proses pencampuran mortar disebabkan derajat keamorfan *fly ash* yang semakin tinggi dan semakin reaktif sehingga akan memberikan kontribusi kuat tekan dari reaksi pozzolanik *fly ash* [8]. Bentuk sferis dan ukuran yang relatif kecil ini memberikan luas permukaan yang tinggi, sehingga meningkatkan reaktivitas silika dan alumina terhadap larutan alkali pada proses geopolimerisasi. Selain itu, distribusi ukuran partikel yang merata memungkinkan penyusunan partikel yang lebih rapat dan padat, sehingga dapat mengurangi porositas dan memperbaiki struktur mikro geopolimer. Karakteristik morfologi ini secara keseluruhan mendukung terbentuknya ikatan geopolimer yang lebih kuat dan stabil (Sharma dkk., 2019).

Gambar 2. Hasil Pengujian SEM

Hasil Pengujian Mortar Geopolimer

- a. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer
 Berikut merupakan tabel dan grafik hasil dari pengujian kuat tekan mortar geopolimer dengan pada umur mortar 3 hari, 7 hari, dan 28 hari:

Tabel 3 Hasil Uji Kuat Tekan mortar 3 Hari

Nama Sampel	Kandungan	Benda Uji	Berat (g)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata (MPa)
A	100% FA	1	239	48,47	2.50	19,39	18,69
		2	234	34,51		13,80	
		3	241	57,22		22,89	
B	90% FA 10% CK	1	266	60,04	2.50	24,02	26,27
		2	262	78,99		31,60	
		3	272	58,02		23,21	
C	80% FA 20% CK	1	266	63,42	2.50	25,37	27,94
		2	262	71,43		28,57	
		3	263	74,70		29,88	
D	70% FA 30% CK	1	251	63,44	2.50	25,38	28,13
		2	249	65,96		26,38	

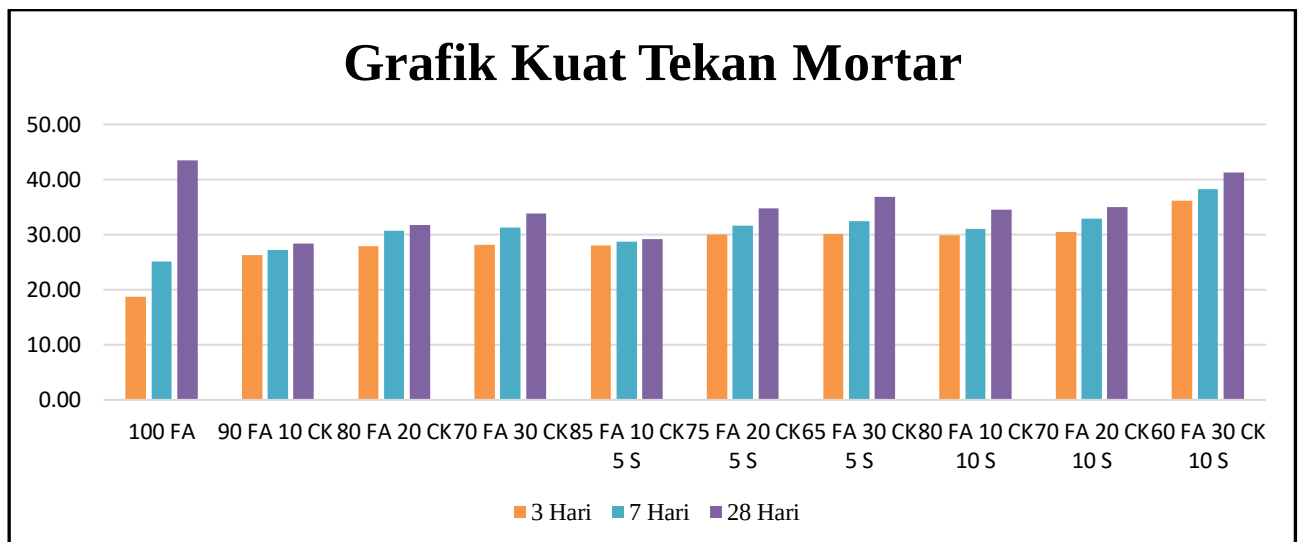
		3	253	81,55		32,62	
B2	85% FA 10% CK 5% S	1	268	47,52	2.50	19,01	28,01
		2	272	75,33		30,13	
		3	283	87,21		34,88	
C2	75% FA 20% CK 5% S	1	251	71,66	2.50	28,66	29,97
		2	253	80,13		32,05	
		3	247	72,97		29,19	
D2	65% FA 30% CK 5% S	1	253	79,53	2.50	31,81	30,15
		2	249	69,87		27,95	
		3	258	76,69		30,68	
B3	80% FA 10% CK 10% S	1	242	55,59	2.50	22,24	29,84
		2	246	78,85		31,54	
		3	246	89,36		35,74	
C3	70% FA 20% CK 10% S	1	266	53,42	2.50	21,37	30,47
		2	262	80,43		32,17	
		3	263	94,70		37,88	
D3	60% FA 30% CK 10% S	1	265	77,60	2.50	31,04	36,21
		2	272	100,47		40,19	
		3	283	93,50		37,40	

Tabel 4 Hasil Uji Kuat Tekan Mortar 7 Hari

Nama Sampel	Kandungan	Benda Uji	Berat (g)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata (MPa)
A	100% FA	1	236	66,30	2.50	26,52	25,11
		2	234	59,25		23,70	
		3	232	62,77		25,11	
B	90% FA 10% CK	1	242	67,33	2.50	26,93	27,23
		2	246	53,92		21,57	
		3	246	83,01		33,20	
C	80% FA 20% CK	1	246	83,93	2.50	33,57	30,66
		2	249	67,34		26,94	
		3	246	78,66		31,46	
D	70% FA 30% CK	1	252	81,87	2.50	32,75	31,22
		2	247	69,61		27,84	
		3	255	82,69		33,08	
B2	85% FA 10% CK 5% S	1	253	71,61	2.50	28,64	28,73
		2	251	67,27		26,91	
		3	250	76,59		30,64	
C2	75% FA 20% CK 5% S	1	249	74,73	2.50	29,89	31,67
		2	245	84,21		33,68	
		3	248	78,55		31,42	
D2	65% FA 30% CK 5% S	1	247	89,05	2.50	35,62	32,47
		2	258	87,59		35,04	
		3	255	66,92		26,77	
B3	80% FA 10% CK 10% S	1	243	80,09	2.50	32,04	31,03
		2	251	83,19		33,28	
		3	249	69,47		27,79	
C3	70% FA 20% CK 10% S	1	258	56,50	2.50	22,60	32,88
		2	250	113,87		45,55	
		3	254	76,21		30,48	
D3	60% FA 30% CK 10% S	1	224	97,29	2.50	38,92	38,21
		2	229	98,82		39,53	
		3	230	90,43		36,17	

Tabel 5 Hasil Uji Kuat Tekan Mortar 28 Hari

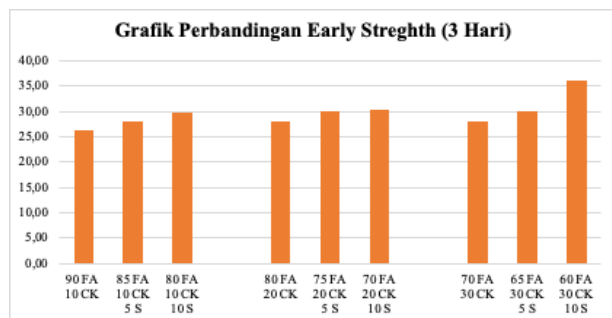
Nama Sampel	Kandungan	Benda Uji	Berat (g)	Beban (kN)	Luas bidang tekan (mm ²)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-Rata (MPa)
A	100% FA	1	232	117,39	2.50	46,96	43,48
		2	234	124,48		49,79	
		3	231	84,25		33,70	
B	90% FA 10% CK	1	239	59,05	2.50	23,62	28,33
		2	249	67,40		26,96	
		3	246	85,99		34,40	
C	80% FA 20% CK	1	274	84,86	2.50	33,94	31,76
		2	282	82,94		33,18	
		3	283	70,40		28,16	
D	70% FA 30% CK	1	256	93,59	2.50	37,44	33,84
		2	250	85,93		34,37	
		3	246	74,28		29,71	
B2	85% FA 10% CK 5% S	1	256	69,54	2.50	27,82	29,15
		2	255	79,87		31,95	
		3	267	69,22		27,69	
C2	75% FA 20% CK 5% S	1	251	95,88	2.50	38,35	34,74
		2	242	89,22		35,69	
		3	248	75,44		30,18	
D2	65% FA 30% CK 5% S	1	250	95,72	2.50	38,29	36,88
		2	253	84,85		33,94	
		3	247	96,04		38,42	
B3	80% FA 10% CK 10% S	1	281	89,91	2.50	35,96	34,52
		2	275	77,48		30,99	
		3	275	91,49		36,60	
C3	70% FA 20% CK 10% S	1	243	77,98	2.50	31,19	34,97
		2	246	80,60		32,24	
		3	250	103,71		41,48	
D3	60% FA 30% CK 10% S	1	242	105,50	2.50	42,20	41,28
		2	241	109,65		43,86	
		3	249	94,46		37,78	



Gambar 3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar

Berdasarkan gambar 3, variasi komposisi material sangat memengaruhi pertumbuhan kekuatan tekan, terutama pada fase awal (3 hari) dan kekuatan maksimum di hari ke-28. Sampel A (100% *fly ash*) tanpa campuran semen atau cangkang kerang menunjukkan perkembangan kekuatan ideal, dari 18,69 MPa (3 hari) menjadi 43,48 MPa (28 hari), dan dijadikan sebagai kontrol. Substitusi sebagian *fly ash* dengan bubuk cangkang kerang tanpa semen, seperti pada sampel B (90% FA + 10% Cangkang), menghasilkan kuat tekan 26,27 MPa (3 hari) dan 28,33 MPa (28 hari), menunjukkan peningkatan reaktivitas awal akibat kandungan CaO, namun penurunan pada jangka panjang, sebagaimana didukung oleh Liu et al. (2024) dan Ridha et al. (2022) yang menyatakan bahwa material berkalsium seperti copper slag atau cangkang kerang cenderung meningkatkan kekuatan awal namun dapat menurunkan performa jangka panjang karena pengaruhnya terhadap struktur mikro. Pada sampel C dan D, dengan kadar cangkang lebih tinggi (20–30%), kuat tekan akhir tetap lebih rendah dibanding kontrol, masing-masing 31,76 MPa dan 33,84 MPa, karena lambatnya reaksi CaCO_3 dibanding silika dan alumina dalam pembentukan gel N-A-S-H.

Sebaliknya, penambahan semen dalam komposisi seperti B2 (85% FA + 10% Cangkang + 5% Semen) menghasilkan kekuatan tekan 36,88 MPa (28 hari), lebih tinggi dari B, menunjukkan bahwa meskipun sedikit, semen membantu pembentukan gel C-A-S-H yang memperkuat jaringan geopolimer, sebagaimana dijelaskan oleh Nath dan Sarker (2015). Tren serupa terlihat pada C2 dan D2, dan semakin meningkat pada B3, C3, dan D3 yang mengandung 10% semen, di mana D3 mencapai 41,28 MPa pada hari ke-28, hampir menyamai sampel A. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi *fly ash* yang masih dominan dengan tambahan semen mampu mengimbangi efek negatif penambahan cangkang kerang, sesuai temuan Assi et al. (2016) yang menyatakan bahwa semen dapat memperbaiki kekuatan tekan serta struktur mikro *geopolymer*.



Gambar 4 Perbandingan Kuat Tekan pada umur 3 Hari yang ditambahkan semen

Gambar 4 menunjukkan bahwa penambahan semen dalam campuran mortar berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kuat tekan awal (*early strength*) pada umur 3

hari, di mana semakin tinggi persentase semen, semakin besar nilai kuat tekan yang dicapai, seperti terlihat pada kelompok B (26,27 MPa menjadi 29,84 MPa) dan kelompok D yang mencapai puncaknya di 36,21 MPa pada D3. Peningkatan ini disebabkan oleh percepatan proses hidrasi yang terjadi akibat penambahan semen, memperkuat ikatan antar partikel dan mendorong reaksi kimia lebih cepat, sebagaimana didukung oleh temuan Tjoanto et al. (2022) dan Luntungan et al. (2020). Namun, meskipun penambahan semen efektif dalam meningkatkan kekuatan awal, efeknya pada umur 28 hari tidak selalu proporsional, terutama ketika digunakan bersama komposisi cangkang kerang yang tinggi, sehingga diperlukan keseimbangan dengan *fly ash* agar proses geopolimerisasi tetap berjalan optimal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan, berikut merupakan kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Substitusi *fly ash* dengan limbah cangkang kerang dan semen berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan mortar geopolimer; penambahan cangkang kerang (10–30%) tanpa semen menurunkan kuat tekan umur 28 hari dibandingkan kontrol, meskipun kuat tekan umur 3 hari meningkat karena sifat pozzolanik dan kandungan CaO yang mempercepat reaksi awal, tetapi tidak efektif untuk penguatan jangka panjang. Penambahan semen (5–10%) justru mampu meningkatkan kuat tekan secara signifikan di umur 3, 7, dan 28 hari karena pembentukan senyawa C-S-H dan C-A-S-H yang memperkuat struktur bersama gel N-A-S-H dari *fly ash*.
2. Komposisi D3 (60% *fly ash* + 30% cangkang kerang + 10% semen) memberikan kuat tekan tertinggi di antara seluruh variasi selain kontrol, yaitu 36,21 MPa (3 hari), 38,21 MPa (7 hari), dan 41,28 MPa (28 hari), menunjukkan bahwa komposisi dengan *fly ash* yang masih dominan dan semen yang cukup mampu menutupi kekurangan reaktivitas cangkang kerang.
3. Penambahan semen secara signifikan meningkatkan *high early strength* atau kuat tekan awal (3 hari), namun tidak selalu disertai peningkatan kekuatan jangka panjang, terutama jika kadar *fly ash* dikurangi secara berlebihan.

Daftar Pustaka

- Amin, M., & Suharto. (2017). Pembuatan Semen Geopolimer Ramah Lingkungan Berbahan Baku Mineral Basal Guna Menuju Lampung Sejahtera The Producing Of Environmental Friendly Geopolymer Cement With Raw Material Of Basalt Minerals To Accomplish Welfare Lampung. *Inovasi Pembangunan - Jurnal Kelitbangan*, 05(01), 30–45.

- ASTM C109/C109M (2023). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens.
- ASTM C618. (1994). Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, 04(02).
- Assi, L., Ghahari, S., Deaver, E., Leaphart, D., & Ziehl, P. (2016). Improvement of the early and final compressive strength of fly ash-based geopolimer concrete at ambient conditions. *Construction and Building Materials*, 123, 806–813. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.069>
- Fendria, R., Irwan, I., & Sumantri, A. (2024). Desain Beton High Early Strength (HES) dengan Campuran Superplasticizer. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil Dan Arsitektur (JITAS)*, 3(1), 18–26. <https://doi.org/10.31289/jitas.v3i1.3875>
- Fetisov, G. V. (2020). X-ray diffraction methods for structural diagnostics of materials: progress and achievements. *Physics-Uspekhi*, 63(1), 2–32. <https://doi.org/10.3367/ufne.2018.10.038435>
- International, A. (2014). *Designation: C270 – 14a Standard Specification for Mortar for Unit Masonry 1*. <https://doi.org/10.1520/C0270-14A>
- Kheradmand, M., Abdollahnejad, Z., & Pacheco-Torgal, F. (2018). Performance of a Fly Ash Geopolymeric Based Binder with Calcium Hydroxide, Portland Cement and Metakaolin as Additives. *The Open Civil Engineering Journal*, 12(1), 167–186. <https://doi.org/10.2174/1874149501812010167>
- Liu, X., Zhang, Q., Lu, X., Fan, J., Wei, S., Liu, J., Li, Q., & Wang, S. (2024). Mechanical properties and hydration of fly ash-based geopolymers modified by copper slag. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26087>
- Luntungan, M., Manalip, R., & Lomboan, D. (2020). Optimalisasi Kuat Tekan Beton Geopolymer dengan Menambahkan Semen atau Kapur pada Perawatan Temperatur Ruangan. *Jurnal Sipil Statik*, 8(3), 217–224. Diakses dari <https://ejournal.unsrat.ac.id/v2/index.php/jss/article/view/24152>
- Malik, Y. (2016). *STUDI PENGARUH TEMPERATUR DAN WAKT UCURING TERHADAP SIFAT FISIK–MEKANIK SEMEN GEOPOLIMER BERBASIS SLAG FERRONICKEL*. INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER.
- Maulana, M. R., & Wardhono, A. (2016). Hubungan Tegangan-Regangan Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang (Fly Ash) dan Limbah Kerang pada Temperatur Normal. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 1(1), 42–48
- Nasional, B. S. (2002). *Standar Nasional Indonesia Badan Standardisasi Nasional Metode pengujian kekuatan tekan mortar semen portland untuk pekerjaan sipil*.
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2015). Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature. *Cement and Concrete Composites*, 55, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.09.008>
- Oktafianti, L. (2018). Pengaruh Penambahan Serbuk Cangkang Kerang terhadap Porositas dan Permeabilitas Beton Geopolymer Berbahan Dasar Abu Terbang dan NaOH 10 Molar. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, 02(02), 101–108.
- Oyedotun, T. D. T. (2018). X-ray fluorescence (XRF) in the investigation of the composition of earth materials: a review and an overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 148–154. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452459>
- Peraturan Pemerintah No. 85. (1999). Perubahan Atas Peraturan Pemerintah No. 18 Tahun 1999 Tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun.
- Pratiwi, W. D. (2019). *Hubungan Morfologi , Ukuran Partikel dan Keamorfian Fly Ash dengan Kuat Tekan Pasta*. Seminar Nasional MASTER 2019. Maritim, Sains dan Teknologi Terapan. <https://journal.ppns.ac.id/index.php/SeminarMASTER/article/view/1316/946>
- Prastiwi, Y. A. (2021). *Mortar Geopolimer dengan Subtitusi Tanah Putih* (A. Hidayat, Ed.; 1st ed.). Mazda Media.
- Prayogo, N. B. (2017). TIM EJOURNAL Ketua Penyunting: Penyunting: Mitra bestari. *Rekayasa Teknik Sipil*, 02(02), 141–149.
- Restu, F. S. (2017). *Pengaruh Penggunaan Limbah Cangkang Kerang dan Fly Ash pada Binder Geopolimer*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ridha, S., Dzulkarnain, I., Abdurrahman, M., Ilyas, S. U., & Bataee, M. (2022). Microstructural properties and compressive strength of fly ash-based geopolymer cement immersed in CO₂-saturated brine at elevated temperatures. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19, 7589–7598. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03665-9>

- 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. (2018). FLY ASH SEBAGAI BAHAN PENGANTI SEMEN PADA BETON. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, 17, 1–8.
- Shofwan Ali, M., & Walujodjati, E. (2021). Pengujian Kuat Tekan Mortar dengan Campuran Pasir Ladot. *Jurnal Konstruksi*, 19(1), 313–324. <https://jurnal.itg.ac.id/>
- Sihombing, A. P., Afrizal, Y., & Gunawan, A. (2018). PENGARUH PENAMBAHAN ARANG BATOK KELAPA TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR. *Jurnal Inersia*, 10(1), 31–38.
- Siregar, S. M. (2009). Pemanfaatan Kulit Kerang dan Resin Epoksi Terhadap Karakteristik Beton Polimer. Tesis, Universitas Sumatera Utara, Sekolah Pascasarjana Magister Ilmu Fisika, Medan.
- Syafoetri, N. A., Djauhari, Z., & Olivia, M. (2018). Karakteristik Mortar Dengan Campuran Abu Kerang Lokan Dalam Rendaman NaCl. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 14(1), 63. <https://doi.org/10.25077/jrs.14.1.63-72.2018>
- Tjoanto, H., Rante, R., & Manalip, R. (2022). *Pengujian Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Penambahan Semen Putih pada Perawatan Suhu Ruang*. *Jurnal Sipil Statik*, 10(8), 751–758. <https://ejournal.unsrat.ac.id/v2/index.php/jss/article/view/39098>
- Zuraidah, S., & Hastono, B. (2018). Pengaruh Variasi Komposisi Campuran Mortar Terhadap Kuat Tekan. *Ge-STRAM: Jurnal Perencanaan Dan Rekayasa Sipil*, 1(1), 8–13. <https://doi.org/10.25139/jprs.v1i1.801>