



STUDI EKSPERIMENTAL VARIASI MOLARITAS NaOH PADA MORTAR GEOPOLIMER BERBASIS ABU SEKAM PADI DAN ABU TERBANG

Adji Sutama*, Verinazul Septriansyah

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Palembang

*Corresponding Author, Email : adji_sutama@um-palembang.ac.id

ABSTRAK

Produksi semen Portland menyumbang sekitar 8-10% emisi CO_2 global, sehingga mendorong pengembangan material konstruksi alternatif yang lebih berkelanjutan, salah satunya mortar geopolimer. Penelitian ini bertujuan mengkaji pengaruh variasi molaritas natrium hidroksida (NaOH) terhadap sifat fisik dan mekanik mortar geopolimer berbasis abu sekam padi dan abu terbang. Lima variasi molaritas NaOH diterapkan, yaitu 8 M, 10 M, 12 M, 14 M, dan 16 M, dengan rasio natrium silikat (Na_2SiO_3) terhadap NaOH tetap sebesar 2,5:1 dan substitusi abu sekam padi sebesar 5% dari berat abu terbang. Benda uji berbentuk kubus berukuran $50 \times 50 \times 50$ mm dirawat pada suhu $60^\circ C$ selama 24 jam, lalu diuji kuat tekan pada umur 14, 21, dan 28 hari. Sebelum pengujian, karakterisasi bahan baku dilakukan menggunakan analisis X-ray fluorescence (XRF) yang mengonfirmasi bahwa abu sekam padi dan abu terbang memenuhi persyaratan material pozzolan SNI 2460:2014 dengan total $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ masing-masing sebesar 92,46% dan 84,76%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa molaritas NaOH berpengaruh signifikan terhadap densitas dan kuat tekan mortar geopolimer. Molaritas optimal dicapai pada 14 M dengan densitas $2229,92 \text{ kg/m}^3$ dan kuat tekan 39,19 MPa pada umur 28 hari, meningkat 69,7% dibandingkan molaritas 8 M (23,10 MPa). Peningkatan molaritas ke 16 M justru menurunkan kuat tekan menjadi 37,19 MPa, yang diduga akibat kelebihan ion OH^- yang menghambat proses geopolimerisasi (over-alkalisasi). Disimpulkan bahwa konsentrasi NaOH 14 M merupakan kondisi optimal dalam sistem mortar geopolimer abu sekam padi-abu terbang untuk menghasilkan sifat mekanik terbaik.

Kata Kunci : Molaritas NaOH; Abu Sekam Padi; Abu Terbang; Mortar Geopolimer

ABSTRACT

Portland cement production contributes approximately 8-10% of global CO_2 emissions, prompting the development of sustainable alternative construction materials, including geopolimer mortar. This study investigates the effect of sodium hydroxide (NaOH) molarity variations on the physical and mechanical properties of geopolimer mortar based on rice husk ash and fly ash. Five NaOH molarity levels were applied (8 M, 10 M, 12 M, 14 M, and 16 M) with a fixed sodium silicate (Na_2SiO_3) to NaOH ratio of 2.5:1 and a rice husk ash substitution of 5% by weight of fly ash. Cubic specimens ($50 \times 50 \times 50$ mm) were cured at $60^\circ C$ for 24 hours and tested for compressive strength at 14, 21, and 28 days. Prior to testing, raw materials were characterized using X-ray fluorescence (XRF) analysis, which confirmed that both rice husk ash and fly ash satisfied the SNI 2460:2014 pozzolanic material requirements, with total $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ contents of 92.46% and 84.76%, respectively. The results revealed that NaOH molarity significantly influenced both the density and compressive strength of the geopolimer mortar. The optimum molarity was found at 14 M, yielding a density of 2229.92 kg/m^3 and a compressive strength of 39.19 MPa at 28 days, representing a 69.7% increase over the 8 M mixture (23.10 MPa). Increasing the molarity to 16 M, however, reduced the compressive strength to 37.19 MPa, likely due to an excess of OH^- ions inhibiting the geopolimerization process (over-alkalization). It is concluded that a 14 M NaOH concentration is the optimum condition for the rice husk ash-fly ash geopolimer mortar system to achieve superior mechanical performance.

Keywords : NaOH Molarity; Rice Husk Ash; Fly Ash; Geopolimer Mortar

PENDAHULUAN

Industri konstruksi di tingkat global saat ini menghadapi tantangan signifikan dalam menurunkan jejak karbon sekaligus meningkatkan keberlanjutan material bangunan. Salah

satu penyumbang utama emisi CO₂ adalah produksi semen Portland, yang diperkirakan menyumbang sekitar 8–10% dari total emisi karbon dunia (Andrew, 2018; Miller *et al.*, 2018). Situasi ini mendorong penelitian intensif untuk mengembangkan material alternatif yang lebih ramah lingkungan namun tetap memenuhi persyaratan teknis konstruksi.

Geopolimer telah muncul sebagai salah satu solusi paling menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Material ini merupakan polimer anorganik yang terbentuk melalui reaksi polikondensasi antara material aluminosilikat dengan larutan alkali pada suhu tertentu (Davidovits, 2020). Berbeda dengan semen Portland yang menghasilkan kalsium silikat hidrat (C-S-H), geopolimer membentuk struktur tiga dimensi dari rantai aluminosilikat yang menghasilkan kekuatan mekanik tinggi dengan emisi karbon yang jauh lebih rendah (Singh *et al.*, 2015; Provis & Van Deventer, 2014).

Abu sekam padi (*rice husk ash*) adalah bahan pozzolan potensial yang belum dimanfaatkan secara maksimal. Indonesia menghasilkan sekitar 22 juta ton sekam padi per tahun, yang setelah dibakar dapat menghasilkan 4-5 juta ton abu sekam padi (Hwang & Huynh, 2015). Dengan kandungan silika (SiO₂) sebesar 85–95%, abu sekam padi berperan sebagai sumber silika reaktif yang sangat baik dalam sintesis geopolimer (Sua-iam & Makul, 2014). Namun, penerapannya secara tunggal masih terbatas akibat rendahnya kandungan alumina yang diperlukan untuk menghasilkan struktur geopolimer yang kuat dan stabil.

Abu terbang (*fly ash*) merupakan residu hasil pembakaran batubara pada pembangkit listrik yang telah banyak dimanfaatkan sebagai material pozzolan karena memiliki keseimbangan kandungan silika dan alumina yang sesuai untuk aplikasi geopolimer (Ul Haq *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018). Penggabungan abu sekam padi dan abu terbang berpotensi mengoptimalkan rasio Si/Al, yang menjadi parameter penting dalam menentukan mutu geopolimer. Sejumlah penelitian melaporkan bahwa kombinasi kedua bahan tersebut mampu menghasilkan sifat mekanik yang lebih unggul dibandingkan dengan penggunaan masing-masing material secara terpisah (Bernal *et al.*, 2014; Heah *et al.*, 2012).

Dalam geopolimerisasi, aktivator alkali memainkan peranan utama. Natrium silikat (Na₂SiO₃) dan natrium hidroksida (NaOH) banyak digunakan karena mampu melarutkan spesi aluminosilikat dari bahan prekursor dan mendorong reaksi polikondensasi (Luukkonen *et al.*, 2018). Khususnya, molaritas NaOH merupakan parameter penting yang secara signifikan memengaruhi laju disolusi prekursor, pembentukan gel geopolimer, serta karakteristik fisik dan mekanik produk akhir (Nath & Sarker, 2014; Xie *et al.*, 2019).

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa molaritas NaOH memiliki hubungan yang kompleks dengan kinerja geopolimer. Molaritas yang terlalu rendah dapat menyebabkan disolusi prekursor yang tidak sempurna dan pembentukan gel geopolimer yang terbatas, sementara molaritas yang terlalu tinggi dapat menyebabkan reaksi yang terlalu cepat, pembentukan produk sekunder yang tidak diinginkan, dan bahkan degradasi struktur (Gao *et al.*, 2015). Namun demikian, molaritas optimal sangat bergantung pada jenis prekursor, rasio aktivator, dan kondisi *curing* yang digunakan, sehingga memerlukan investigasi spesifik untuk setiap sistem material. Meskipun banyak penelitian telah membahas geopolimer berbasis abu terbang maupun abu sekam padi secara terpisah, studi yang secara sistematis menilai pengaruh molaritas NaOH pada sistem kombinasi kedua bahan tersebut masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kekosongan tersebut dengan meneliti

secara menyeluruh efek variasi molaritas NaOH (8 M, 10 M, 12 M, 14 M, dan 16 M) terhadap sifat fisik dan mekanik mortar geopolimer berbasis abu sekam padi dan abu terbang. Pemahaman yang lebih mendalam mengenai keterkaitan antara molaritas aktivator dan performa material diharapkan dapat mendukung optimasi formulasi campuran geopolimer sekaligus memperluas penerapan material berkelanjutan ini dalam konstruksi.

METODE PENELITIAN

Material

Penelitian ini menggunakan abu sekam padi dan abu terbang sebagai prekursor utama. Abu sekam padi dibuat dengan membakar sekam padi pada suhu 600–700°C selama 5 jam untuk memperoleh kandungan silika amorf tinggi, sementara abu terbang yang digunakan termasuk kelas F. Analisis kimia kedua material dilakukan menggunakan *X-ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi oksidanya. Agregat halus yang digunakan berupa pasir alam yang telah memenuhi persyaratan standar. Untuk meningkatkan *workability* campuran, ditambahkan superplasticizer naftalena sebesar 2% dari berat prekursor.

Larutan aktivator alkali terdiri dari campuran natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH). Larutan NaOH dibuat dengan melarutkan pelet NaOH ke dalam air suling secara bertahap sambil diaduk hingga larut sempurna. Jumlah NaOH yang digunakan untuk masing-masing variasi molaritas adalah 320 gram (8 M), 400 gram (10 M), 480 gram (12 M), 560 gram (14 M), dan 640 gram (16 M), dengan volume akhir larutan masing-masing sebesar 1 liter. Setelah mencapai suhu ruang, larutan disimpan dalam wadah tertutup selama 24 jam sebelum digunakan. Karena proses pelarutan bersifat eksotermis, seluruh prosedur dilakukan dengan hati-hati menggunakan alat pelindung diri.

Karakterisasi Material

Pengujian dan karakterisasi agregat halus dilakukan sesuai standar SNI/ASTM untuk memastikan material memenuhi persyaratan teknis campuran mortar. Hasil uji karakteristiknya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Uji Karakteristik Agregat Halus

Pengujian	Hasil	Persyaratan
Berat jenis curah kering	2,408	2,30-2,90
Berat jenis curah JKP	2,445	2,30-2,90
Berat jenis semu	2,500	2,30-2,90
Daya serap air (%)	1,523	0-8
Kadar air (%)	2,461	0-10
Kandungan lumpur, lolos saringan No. 200 (%)	1,453	Maks. 5
Berat isi kondisi gembur (kg/ltr)	1,240	-
Berat isi kondisi padat (kg/ltr)	1,437	-
Kandungan bahan organik, nomor warna	2	Maks. No. 3
Analisa saringan, ukuran maksimum (mm)	2,360	-
Modulus halus butir	2,831	2,0-3,1

Komposisi kimia abu sekam padi dan abu terbang dianalisis menggunakan XRF. Hasil analisis XRF abu sekam padi disajikan pada Tabel 2, sedangkan hasil analisis XRF abu terbang disajikan pada Tabel 3. Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa kandungan SiO_2

pada abu sekam padi sangat tinggi (91,42%), memenuhi persyaratan SNI 2460:2014 untuk bahan pozzolan kelas N. Total kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ mencapai 92,46%, jauh melebihi persyaratan minimum 70%. Abu terbang yang digunakan juga memenuhi persyaratan SNI 2460:2014 kelas F dengan total kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ sebesar 84,76%. Kandungan *Loss on Ignition* (LOI) pada abu sekam padi sebesar 3,42% dan abu terbang sebesar 1,28%, keduanya di bawah batas maksimum yang dipersyaratkan, mengindikasikan tingkat pembakaran yang baik.

Tabel 2. Hasil Analisis XRF Abu Sekam Padi

No.	Komposisi Kimia	Hasil (%)	Persyaratan SNI 2460:2014 Kelas N (%)	
1	SiO_2	91,42	Min. ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	70
2	Al_2O_3	0,61		
3	Fe_2O_3	0,43		
4	MgO	0,83	Maks.	4
5	K_2O	2,31		
6	SO_3	0,38		
7	TiO_2	0,11	Maks.	10
8	CaO	1,36		
9	Na_2O	0,21		
10	LOI	3,42		

Sumber : Utama et al. (2025)

Tabel 3. Hasil Analisis XRF Abu Terbang

No.	Komposisi Kimia	Hasil (%)	Persyaratan SNI 2460:2014 Kelas F (%)	
1	SiO_2	50,07	Min. ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$)	70
2	Al_2O_3	30,41		
3	Fe_2O_3	4,28		
4	MgO	2,41	Maks.	5
5	K_2O	0,778		
6	SO_3	0,348		
7	TiO_2	0,811	Maks.	6
8	CaO	4,12		
9	Na_2O	4,88		
10	LOI	1,28		

Sumber : Utama & Oemiati (2022)

Perancangan Campuran

Dalam penelitian ini, perancangan campuran mortar geopolimer mengacu pada beberapa parameter, yaitu rasio alkali aktivator terhadap prekursor 0,5; rasio natrium silikat terhadap natrium hidroksida 2,5:1; substitusi abu terbang dengan abu sekam padi sebesar 5%; perbandingan agregat halus terhadap prekursor sebesar 2; dan penggunaan superplasticizer sebesar 2% dari berat prekursor. Komposisi campuran untuk tiap variasi molaritas NaOH disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Komposisi Campuran

Variasi Molaritas NaOH	Abu Sekam Padi (gr)	Abu Terbang (gr)	Agregat Halus (gr)	Larutan Na_2SiO_3 (gr)	Larutan NaOH (gr)	Superplasticizer (gr)
8 M	37,13	705,38	1485,02	265,18	106,07	14,85
10 M	37,13	705,38	1485,02	265,18	106,07	14,85
12 M	37,13	705,38	1485,02	265,18	106,07	14,85
14 M	37,13	705,38	1485,02	265,18	106,07	14,85
16 M	37,13	705,38	1485,02	265,18	106,07	14,85

Prosedur Pembuatan Spesimen

Pembuatan mortar geopolimer dilakukan dengan mencampurkan abu sekam padi dan abu terbang dalam kondisi kering terlebih dahulu menggunakan *mixer* selama 3 menit untuk memastikan homogenitas. Agregat halus kemudian ditambahkan dan dicampur selama 2 menit. Larutan aktivator alkali disiapkan dengan mencampurkan larutan natrium silikat dan natrium hidroksida sesuai rasio yang telah ditentukan, kemudian dibiarkan selama 15 menit untuk stabilisasi. Larutan aktivator dan superplasticizer kemudian ditambahkan ke dalam campuran kering dan diaduk selama 5 menit hingga mencapai konsistensi yang homogen.

Mortar segar kemudian dituang ke dalam cetakan kubus berukuran 50×50×50 mm dan dipadatkan menggunakan *vibrating table* selama 30 detik untuk menghilangkan gelembung udara. Permukaan spesimen diratakan dan cetakan ditutup dengan plastik untuk mencegah penguapan. Spesimen kemudian dirawat (*curing*) dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam untuk mempercepat reaksi geopolimerisasi. Setelah *curing*, spesimen dikeluarkan dari cetakan dan disimpan pada suhu ruang hingga umur pengujian. Untuk setiap variasi molaritas NaOH, dibuat 9 spesimen: 3 spesimen untuk pengujian umur 14 hari, 3 spesimen untuk umur 21 hari, dan 3 spesimen untuk umur 28 hari.

Pengujian

Pengujian berat jenis (densitas) dilakukan pada umur 14, 21, dan 28 hari dengan mengacu pada prinsip ASTM C642. Spesimen ditimbang dalam kondisi kering oven, kemudian volume ditentukan berdasarkan dimensi geometris spesimen (50×50×50 mm). Berat jenis dihitung sebagai rasio massa terhadap volume dalam satuan kg/m³. Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan kapasitas 2000 kN sesuai dengan ASTM C109. Laju pembebanan dijaga konstan pada 0,9 MPa/detik hingga spesimen mengalami kegagalan. Kuat tekan dihitung sebagai beban maksimum dibagi luas penampang dalam satuan MPa. Nilai yang dilaporkan adalah rata-rata dari tiga spesimen untuk setiap variasi dan umur pengujian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berat Jenis Mortar Geopolimer

Hasil pengujian berat jenis mortar geopolimer pada berbagai variasi molaritas NaOH dan umur pengujian disajikan pada Tabel 5. Berat jenis merupakan indikator penting yang mencerminkan tingkat kepadatan dan porositas material, yang selanjutnya berkorelasi dengan sifat mekanik dan durabilitas.

Tabel 5. Hasil Pengujian Berat Jenis Mortar

Variasi Molaritas NaOH	Berat Jenis Mortar (kg/m ³)		
	14 Hari	21 Hari	28 Hari
8 M	2000,00	2008,80	2064,40
10 M	2084,80	2123,36	2142,72
12 M	2129,36	2141,20	2167,04
14 M	2149,92	2179,28	2229,92
16 M	2118,16	2131,20	2162,56

Data menunjukkan bahwa berat jenis mortar geopolimer meningkat seiring dengan peningkatan molaritas NaOH dari 8 M hingga 14 M, kemudian mengalami penurunan pada

16 M. Pada umur 28 hari, berat jenis tertinggi dicapai pada molaritas 14 M dengan nilai 2229,92 kg/m³, sementara berat jenis terendah terjadi pada molaritas 8 M dengan nilai 2064,40 kg/m³. Peningkatan berat jenis hingga molaritas 14 M mengindikasikan bahwa konsentrasi alkali yang lebih tinggi memfasilitasi disolusi spesi aluminosilikat yang lebih baik dari prekursor dan mendorong pembentukan gel geopolimer yang lebih padat.

Fenomena ini sejalan dengan penelitian Xie *et al.* (2019) yang menjelaskan bahwa peningkatan konsentrasi NaOH hingga batas tertentu meningkatkan pH larutan pori dan mempercepat laju disolusi silika dan alumina dari prekursor. Proses disolusi yang lebih efisien menghasilkan lebih banyak spesi reaktif yang tersedia untuk pembentukan polimer Si-O-Al, menghasilkan struktur yang lebih kompak dengan porositas yang lebih rendah. Heah *et al.* (2012) juga melaporkan bahwa peningkatan molaritas NaOH dari 8 M ke 14 M pada geopolimer berbasis kaolin menghasilkan peningkatan densitas sebesar 8-12%, konsisten dengan temuan penelitian ini yang menunjukkan peningkatan sekitar 8% dari 8 M ke 14 M pada umur 28 hari.

Penurunan berat jenis pada molaritas 16 M dapat dijelaskan melalui fenomena *over-alkalization* yang telah didokumentasikan dalam beberapa penelitian. Xie *et al.* (2019) menjelaskan bahwa konsentrasi alkali yang terlalu tinggi dapat menyebabkan reaksi yang terlalu cepat, menghasilkan gel geopolimer yang kurang terpolimerisasi dengan baik dan struktur yang lebih berpori. Gao *et al.* (2015) menambahkan bahwa kelebihan ion OH⁻ dapat mengganggu keseimbangan ionik dalam sistem dan menyebabkan pembentukan fase kristal sekunder seperti *sodium carbonate* yang mengurangi densitas material. Selain itu, reaksi yang terlalu cepat dapat menyebabkan *shrinkage* yang berlebihan selama *curing*, menghasilkan *microcracking* yang meningkatkan porositas.

Tren peningkatan berat jenis dari umur 14 hari ke 28 hari pada semua variasi molaritas menunjukkan bahwa proses geopolimerisasi berlanjut seiring waktu, meskipun dengan laju yang menurun. Peningkatan berat jenis paling signifikan terjadi pada molaritas 8 M, dengan kenaikan 3,2% dari umur 14 ke 28 hari, mengindikasikan bahwa pada konsentrasi alkali yang lebih rendah, reaksi geopolimerisasi berlangsung lebih lambat dan memerlukan waktu yang lebih lama untuk mencapai konversi maksimum. Sebaliknya, pada molaritas tinggi (12 M dan 14 M), peningkatan berat jenis dari umur 14 ke 28 hari lebih kecil (1,7–2,1%), menunjukkan bahwa sebagian besar reaksi telah terjadi pada umur awal karena aktivasi alkali yang lebih cepat.

Kuat Tekan Mortar Geopolimer

Hasil pengujian kuat tekan mortar geopolimer pada berbagai variasi molaritas NaOH dan umur pengujian disajikan pada Tabel 6. Kuat tekan merupakan parameter mekanik paling penting yang menentukan kelayakan material untuk aplikasi struktural.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar

Variasi Molaritas NaOH	Kuat Tekan Mortar (MPa)		
	14 Hari	21 Hari	28 Hari
8 M	19,16	21,08	23,10
10 M	24,38	28,10	29,05
12 M	31,84	34,59	38,63
14 M	34,06	35,67	39,19
16 M	30,00	32,50	37,19

Hasil pengujian memperlihatkan bahwa molaritas NaOH sangat memengaruhi kuat tekan mortar geopolimer. Kuat tekan meningkat saat molaritas NaOH dinaikkan dari 8 M hingga 14 M, namun menurun pada 16 M. Kekuatan maksimum tercapai pada 14 M, yaitu 39,19 MPa pada umur 28 hari, meningkat 69,7% dibandingkan 23,10 MPa pada 8 M. Kenaikan molaritas ke 16 M justru menurunkan kuat tekan menjadi 37,19 MPa, menandakan adanya molaritas optimal untuk sistem material ini.

Peningkatan kuat tekan dengan meningkatnya molaritas NaOH dari 8 M ke 14 M dapat dijelaskan melalui beberapa mekanisme. Pertama, konsentrasi alkali yang lebih tinggi meningkatkan efektivitas disolusi spesi Si dan Al dari prekursor, menghasilkan lebih banyak monomer dan oligomer yang tersedia untuk reaksi polikondensasi (Singh *et al.*, 2015). Kedua, pH yang lebih tinggi mempercepat laju reaksi geopolimerisasi dan mendorong pembentukan jaringan polimer Si-O-Al yang lebih ekstensif dan terhubung dengan baik (Luukkonen *et al.*, 2018). Ketiga, peningkatan densitas gel geopolimer yang terbentuk mengurangi porositas dan meningkatkan kekompakan matriks, yang secara langsung berkontribusi terhadap peningkatan kuat tekan (Provis & Van Deventer, 2014).

Penurunan kuat tekan pada molaritas 16 M konsisten dengan fenomena yang telah dilaporkan dalam literatur. Bernal *et al.* (2014) menjelaskan bahwa konsentrasi alkali yang berlebihan dapat menyebabkan beberapa efek negatif: (1) reaksi yang terlalu cepat menghasilkan gel yang kurang terpolimerisasi dengan struktur yang lebih lemah, (2) kelebihan ion natrium dapat tertinggal dalam sistem sebagai fase non-reaktif yang mengganggu kontinuitas matriks, dan (3) *shrinkage* yang berlebihan selama *curing* dapat menghasilkan *microcracking* yang mengurangi kekuatan. Zhang *et al.* (2018) juga melaporkan bahwa pada molaritas NaOH di atas 14 M, terjadi pembentukan natrium karbonat yang signifikan dari reaksi dengan CO₂ atmosferik, yang dapat melemahkan struktur geopolimer.

Perkembangan kuat tekan dari umur 14 hari ke 28 hari menunjukkan pola yang menarik. Pada molaritas rendah (8 M dan 10 M), peningkatan kuat tekan relatif besar (20,6% dan 19,1%), mengindikasikan bahwa reaksi geopolimerisasi berlangsung lebih lambat dan terus berlanjut hingga umur lanjut. Pada molaritas optimal 14 M, peningkatan dari umur 14 ke 28 hari lebih moderat (15,1%), menunjukkan bahwa sebagian besar reaksi telah terjadi pada umur awal. Menariknya, pada molaritas 16 M terjadi peningkatan kuat tekan yang relatif tinggi (24,0%) meskipun kuat tekannya tidak optimal. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi *over-alkalization* pada 16 M memperlambat reaksi geopolimerisasi pada umur awal, sehingga proses polimerisasi masih terus berlangsung secara signifikan hingga umur 28 hari namun tidak menghasilkan kuat tekan yang optimal akibat struktur gel yang kurang terpolimerisasi dengan baik. Pola ini konsisten dengan pernyataan sebagian besar pengembangan kekuatan telah terjadi pada umur awal. Ul Haq *et al.* (2014) melaporkan pola serupa pada geopolimer berbasis abu terbang, di mana laju pengembangan kekuatan berbanding terbalik dengan konsentrasi aktivator.

Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi positif yang kuat antara berat jenis dan kuat tekan mortar geopolimer. Spesimen dengan berat jenis tertinggi (14 M, 2229,92 kg/m³) juga menunjukkan kuat tekan maksimum (39,19 MPa), sedangkan spesimen dengan berat jenis terendah (8 M, 2064,40 kg/m³) memiliki kuat tekan minimum (23,10 MPa). Temuan ini menegaskan bahwa peningkatan densifikasi matriks melalui optimasi konsentrasi

aktivator merupakan strategi efektif untuk meningkatkan sifat mekanik. Sua-iam dan Makul (2014) melaporkan koefisien korelasi 0,87 antara densitas dan kuat tekan pada geopolimer berbasis abu sekam padi, menunjukkan bahwa pengurangan porositas berperan penting dalam pencapaian kuat tekan tinggi. Perbandingan dengan penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa hasil penelitian ini sebanding dan kompetitif dengan literatur yang ada. Hwang dan Huynh (2015) melaporkan kuat tekan maksimum sebesar 35,2 MPa pada geopolimer yang terbuat dari abu sekam padi murni dengan molaritas 12 M, sedangkan penelitian ini mencapai 38,63 MPa pada molaritas yang sama dengan kombinasi abu sekam padi dan abu terbang. Peningkatan ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua bahan mampu mengoptimalkan rasio Si/Al dan membentuk struktur geopolimer yang lebih baik. Hwang dan Huynh (2015) juga melaporkan bahwa penambahan abu sekam padi pada geopolimer berbasis abu terbang mampu meningkatkan kuat tekan secara signifikan melalui optimasi rasio Si/Al, sejalan dengan temuan penelitian ini.

Implikasi Praktis dan Keberlanjutan

Mortar geopolimer yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan potensi signifikan untuk digunakan dalam aplikasi konstruksi. Dengan kuat tekan 39,19 MPa pada molaritas optimal 14 M, nilai ini melebihi persyaratan minimum untuk mortar struktural (17,2 MPa menurut ASTM C270) dan bahkan masuk dalam kategori beton berkuat tekan sedang. Dari sisi keberlanjutan, substitusi semen Portland dengan kombinasi abu sekam padi dan abu terbang berpotensi menurunkan emisi CO₂ hingga 80–90% (Andrew, 2018; Davidovits, 2020).

Pemanfaatan abu sekam padi, yang merupakan limbah pertanian melimpah di Indonesia, tidak hanya memberikan nilai tambah ekonomi tetapi juga mengatasi masalah lingkungan dari pembuangan limbah. Dengan produksi padi nasional sekitar 54 juta ton per tahun, potensi abu sekam padi yang dapat dimanfaatkan mencapai 2,7 juta ton per tahun. Sebagai gambaran estimatif, jika 10% dari potensi ini digunakan untuk produksi geopolimer (dengan asumsi faktor konversi standar), dapat menggantikan sekitar 250000 ton semen Portland, yang ekuivalen dengan estimasi pengurangan emisi CO₂ sebesar 200000 ton per tahun (Nath & Sarker, 2014). Angka ini bersifat indikatif dan memerlukan kajian lebih lanjut yang mempertimbangkan efisiensi proses dan kondisi lokal secara komprehensif.

KESIMPULAN

Variasi molaritas NaOH memberikan pengaruh signifikan terhadap sifat mortar geopolimer berbasis abu sekam padi dan abu terbang. Nilai molaritas optimum diperoleh pada 14 M, yang menghasilkan berat jenis maksimum sebesar 2229,92 kg/m³ dan kuat tekan tertinggi sebesar 39,19 MPa pada umur 28 hari. Kenaikan molaritas dari 8 M menjadi 14 M meningkatkan kuat tekan sebesar 69,7%, menandakan bahwa konsentrasi aktivator alkali berperan penting dalam memaksimalkan proses geopolimerisasi. Namun demikian, peningkatan molaritas hingga 16 M justru menurunkan performa, yang mengindikasikan terjadinya *over-alkalization*.

Hasil karakterisasi material menunjukkan bahwa abu sekam padi (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ sebesar 92,46%) dan abu terbang (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ sebesar 84,76%) telah memenuhi kriteria standar sebagai material pozzolan. Kombinasi kedua bahan dengan substitusi 5%

abu sekam padi terhadap abu terbang terbukti mampu mengoptimalkan rasio Si/Al serta menghasilkan sifat mekanik yang lebih unggul dibandingkan penggunaan masing-masing material secara terpisah. Hubungan positif yang kuat antara berat jenis dan kuat tekan menunjukkan bahwa densifikasi matriks geopolimer menjadi faktor utama dalam pencapaian kinerja mekanik yang tinggi.

Mortar geopolimer yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan potensi yang sangat baik sebagai material konstruksi berkelanjutan. Kuat tekan yang dicapai (39,19 MPa) melampaui persyaratan untuk aplikasi struktural dan dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 80-90% dibandingkan dengan mortar berbasis semen Portland. Pemanfaatan limbah pertanian (abu sekam padi) dan industri (abu terbang) tidak hanya memberikan manfaat lingkungan tetapi juga membuka peluang ekonomi baru dalam industri konstruksi berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrew, R. M. (2018). *Global CO₂ emissions from cement production*. Earth System Science Data, 10(1), 195-217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Bernal, S. A., Krivenko, P. V., Provis, J. L., Puertas, F., Rickard, W. D. A., Shi, C., & van Riessen, A. (2014). *Other potential applications for alkali-activated materials*. In J. L. Provis & J. S. J. van Deventer (Eds.), *Alkali activated materials: State-of-the-art report*, RILEM TC 224-AAM (pp. 339–379). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2_12
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer chemistry and applications (5th ed.)*. Institut Géopolymère.
- Gao, X., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2015). *Properties of alkali activated slag-fly ash blends with limestone addition*. Cement and Concrete Composites, 59, 119-128. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.01.007>
- Heah, C. Y., Kamarudin, H., Al Bakri, A. M. M., Bnhussain, M., Luqman, M., Nizar, I. K., Ruzaidi, C. M., & Liew, Y. M. (2012). *Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers*. Construction and Building Materials, 35, 912-922. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.102>
- Hwang, C.-L., & Huynh, T.-P. (2015). *Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers*. Construction and Building Materials, 101, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.025>
- Luukkonen, T., Abdollahnejad, Z., Yliniemi, J., Kinnunen, P., & Illikainen, M. (2018). *One-part alkali-activated materials: A review*. Cement and Concrete Research, 103, 21-34. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.001>
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). *Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050*. Cement and Concrete Research, 114, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.026>

- Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). *Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition*. Construction and Building Materials, 66, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080>
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art report*, RILEM TC 224-AAM. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>
- Singh, B., Ishwarya, G., Gupta, M., & Bhattacharyya, S. K. (2015). *Geopolymer concrete: A review of some recent developments*. Construction and Building Materials, 85, 78-90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036>
- Sua-iam, G., & Makul, N. (2014). *Utilization of high volumes of unprocessed lignite-coal fly ash and rice husk ash in self-consolidating concrete*. Journal of Cleaner Production, 78, 184-194. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.060>
- Sutama, A., & Oemiati, N. (2022). *Studi mikrostruktur beton ringan geopolimer dengan Scanning Electron Microscope (SEM) dan X-ray Diffraction (XRD)*. Jurnal Deformasi, 7(2), 145–160. <https://doi.org/10.31851/deformasi.v7i2.9387>
- Sutama, A., Septriasyah, V., & Irawan, T. (2025). *Pengaruh penggunaan abu sekam padi sebagai material substitusi sebagian semen terhadap workabilitas, densitas, dan kekuatan tekan beton*. Jurnal Deformasi, 10(1), 99–109. <https://doi.org/10.31851/1mvr625>
- Ul Haq, E., Padmanabhan, S. K., & Licciulli, A. (2014). *Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers - A comparative study*. Ceramics International, 40(2), 2965-2971. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.10.012>
- Xie, J., Wang, J., Rao, R., Wang, C., & Fang, C. (2019). *Effects of combined usage of GGBS and fly ash on workability and mechanical properties of alkali activated geopolymer concrete with recycled aggregate*. Composites Part B: Engineering, 164, 179-190. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.067>
- Zhang, P., Zheng, Y., Wang, K., & Zhang, J. (2018). *A review on properties of fresh and hardened geopolymer mortar*. Composites Part B: Engineering, 152, 79-95. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.06.031>



Jurnal Deformasi is licensed under
a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License