



Optimasi Rasio Aktivator Beton Geopolimer Dengan Curing Suhu Ruang Terhadap Kuat Tekan Dan Durabilitas Di Daerah Pesisir

Faithful M. S. Waturandang^{#a}, Steenie E. Wallah^{#b}, Marthin D. J. Sumajouw^{#c}

^{#a}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^{#b}megumifaithful@gmail.com, ^{#c}wsteenie@yahoo.com, ^{#d}dody_sumajouw@unsrat.ac.id

Abstrak

Beton geopolimer merupakan material alternatif yang memanfaatkan *fly ash* sebagai pengganti semen Portland dan berpotensi mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan semen. Salah satu faktor yang memengaruhi kinerja beton geopolimer adalah rasio aktivator natrium silikat (Na_2SiO_3) terhadap natrium hidroksida (NaOH). Penelitian ini bertujuan menentukan rasio aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ yang optimum berdasarkan kuat tekan dan durabilitas beton geopolimer berbasis *fly ash*. Penelitian menggunakan *fly ash* sebagai pengganti semen sebesar 100%, larutan NaOH 10 M, dan variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 1,5; 2,0; dan 2,5. Benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm dengan curing suhu ruang selama 28 hari. Pengujian meliputi kuat tekan, absorpsi air, serta kuat tekan setelah perendaman dalam larutan NaCl 3,5% selama 14 hari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rasio aktivator memengaruhi kuat tekan dan durabilitas beton geopolimer. Rasio 2,0 menghasilkan kuat tekan umur 28 hari tertinggi sebesar 10,23 MPa dan absorpsi air terendah sebesar 7,39%. Setelah perendaman dalam larutan NaCl 3,5% selama 14 hari, seluruh variasi mengalami peningkatan kuat tekan dibandingkan benda uji kontrol. Berdasarkan hasil pengujian, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,0 menunjukkan kinerja paling baik karena menghasilkan kuat tekan tertinggi dan absorpsi air terendah pada kondisi kontrol.

Kata kunci: beton geopolimer, *fly ash*, rasio aktivator, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, kuat tekan, absorpsi air

1. Pendahuluan

Indonesia khususnya Sulawesi Utara merupakan daerah tropis dengan wilayah pesisir yang sangat luas. Wilayah pesisir merupakan lingkungan yang agresif terhadap material beton akibat paparan ion klorida dari air laut. Penetrasi ion klorida ke dalam beton merupakan salah satu penyebab utama korosi tulangan baja dan penurunan umur layan struktur beton bertulang. Studi durabilitas beton pada lingkungan laut menunjukkan bahwa transport klorida melalui pori-pori beton menjadi faktor dominan dalam menentukan ketahanan jangka panjang struktur (Shi et al., 2012). Kondisi ini menjadi relevan bagi daerah dengan garis Pantai luas seperti Sulawesi Utara, di mana banyak infrastruktur berada di sekitar wilayah pesisir. Struktur mikro beton OPC yang memiliki porositas kapiler tertentu memungkinkan difusi klorida terjadi melalui mekanisme transport ion dalam kondisi jenuh maupun tidak jenuh. Oleh karena itu, upaya peningkatan durabilitas beton menjadi isu penting dalam rekayasa struktur pesisir. Oleh karena itu, beton geopolimer berbasis *fly ash* dikembangkan melalui proses aktivasi alkali yang menghasilkan gel pengikat utama berupa *Sodium Alumino Silicate Hydrate* (N – A – S – H). Reaksi geopolimerisasi berlangsung melalui beberapa tahapan utama yaitu pelarutan silika dan alumina dari material precursor, transportasi spesies terlarut, polikondensasi, hingga pembentukan jaringan aluminosilikat tiga dimensi. Selama proses tersebut, komposisi larutan aktivator memegang peranan penting karena menentukan jumlah spesies silikat yang tersedia untuk membentuk ikatan Si-O-Al pada gel N-A-S-H. Kualitas jaringan gel yang terbentuk selanjutnya akan memengaruhi kerapatan mikrostruktur, porositas, permeabilitas, serta sifat mekanik dan durabilitas beton geopolimer. Oleh karena itu, optimasi komposisi aktivator merupakan salah satu faktor utama dalam memperoleh performa beton geopolimer yang optimal (Criado et al., 2007; Duxson et al.,

2007; Provis & Van Deventer, 2014). Berbeda dengan sistem OPC yang berbasis kalsium, N – A – S – H memiliki stabilitas kimia yang lebih baik terhadap lingkungan agresif (Davidovits, 1991)

Meskipun beton geopolimer memiliki potensi durabilitas yang baik, performanya sangat dipengaruhi oleh komposisi larutan aktivator alkali, khususnya rasio antara natrium silikat (Na_2SiO_3) dan natrium hidroksida (NaOH). Rasio aktivator mempengaruhi proses pelarutan silika dan alumina dari *fly ash*, pembentukan jaringan polimer aluminosilikat, serta kerapatan struktur mikro (Hardjito & Rangan, 2005). Rasio yang terlalu rendah dapat menyebabkan proses polimerisasi tidak optimal, sedangkan rasio yang terlalu tinggi dapat meningkatkan viskositas campuran dan mempengaruhi *workability* serta pembentukan pori. Selain memengaruhi *workability*, perubahan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ juga berpengaruh terhadap evolusi fase produk reaksi pada sistem alkali-activated materials. Penambahan silika terlarut hingga batas optimum akan meningkatkan pembentukan gel aluminosilikat yang lebih padat. Namun, apabila jumlah silika terlalu tinggi, proses difusi ion menjadi lebih lambat akibat meningkatnya viskositas larutan aktivator sehingga reaksi geopolimerisasi berlangsung kurang efektif. Kondisi tersebut dapat menyebabkan terbentuknya struktur mikro yang kurang homogen dan berdampak pada penurunan performa mekanik maupun kandungan silika lebih tinggi (Criado et al., 2007; Ismail et al., 2014; Luukkonen et al., 2018). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ mempengaruhi derajat polimerisasi, struktur mikro, serta kuat tekan beton geopolimer (Rattanasak & Chindaprasit, 2009). Namun, penelitian yang mengintegrasikan parameter kuat tekan dan ketahanan terhadap klorida sebagai dasar penentuan rasio optimum masih terbatas, khususnya pada kondisi *curing* suhu ruang di lingkungan tropis wilayah pesisir. Simulasi lingkungan air laut dalam skala laboratorium umumnya dilakukan melalui perendaman dalam larutan NaCl dengan konsentrasi 3,5%. Konsentrasi ini digunakan karena secara klorida ekuivalen mendekati kadar salinitas rata-rata air laut alami (Olivia & Nikraz, 2013). Pada beton geopolimer berbasis abu terbang (*fly ash*), paparan lingkungan salin memberikan respons yang berbeda dibandingkan beton berbasis Ordinary Portland Cement (OPC). Proses geopolimerisasi yang berlangsung serta kerapatan struktur matriks N-A-S-H mampu menahan penetrasi ion klorida tanpa mengalami penurunan kekuatan mekanis secara dramatis (Olivia & Nikraz, 2013). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis *fly ash* memiliki ketahanan yang baik pada lingkungan laut maupun lingkungan yang mengandung ion sulfat dan klorida. Hal tersebut disebabkan oleh terbentuknya matriks aluminosilikat yang relative lebih stabil secara kimia dibandingkan pasta semen Portland konvensional, sehingga proses penetrasi ion agresif berlangsung lebih lambat. Selain itu, beton geopolimer umumnya memiliki koefisien difusi klorida dan permeabilitas yang lebih rendah sehingga mampu mempertahankan sifat mekaniknya setelah terpapar lingkungan agresif dalam jangka waktu tertentu (Bakharev, 2005; Olivia & Nikraz, 2013; Provis & Van Deventer, 2014). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ terhadap kuat tekan, absorpsi air, dan ketahanan terhadap paparan NaCl 3,5%, serta menentukan rasio optimum awal berdasarkan performa mekanik dan durabilitas terbatas terhadap klorida.

2. Metode

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental laboratorium dengan pendekatan kuantitatif yang dilaksanakan di Laboratorium Rekayasa Struktur dan Material, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi Manado.

2.1. Material dan Benda Uji

Material yang digunakan meliputi *fly ash* lokal dari PLTU II Amurang, agregat kasar berasal dari Tateli, agregat halus (pasir) dari Klabat, larutan alkali aktivator berupa Natrium Hidroksida (NaOH 10M) dan Natrium Silikat (Na_2SiO_3), *superplasticizer* Sika ViscoCrete-3115N dan air yang berasal dari Laboratorium Rekayasa Struktur dan Material Jurusan Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi. Menggunakan benda uji berbentuk silinder berdiameter 10 cm dan tinggi 20 cm dengan total 36 sampel *curing* 28 hari. Dengan rincian benda uji: 12 sampel untuk pengujian kuat tekan, 3 variasi $\times$ 4 sampel. 12 sampel untuk pengujian absorpsi air lalu kuat tekan, 3 variasi $\times$ 4 sampel. 12 sampel untuk perendaman NaCl 3,5% selama 14 hari lalu kuat tekan, 3 variasi $\times$ 4 sampel. Komposisi campuran rencana mengacu pada Soentpit et al. (2018)

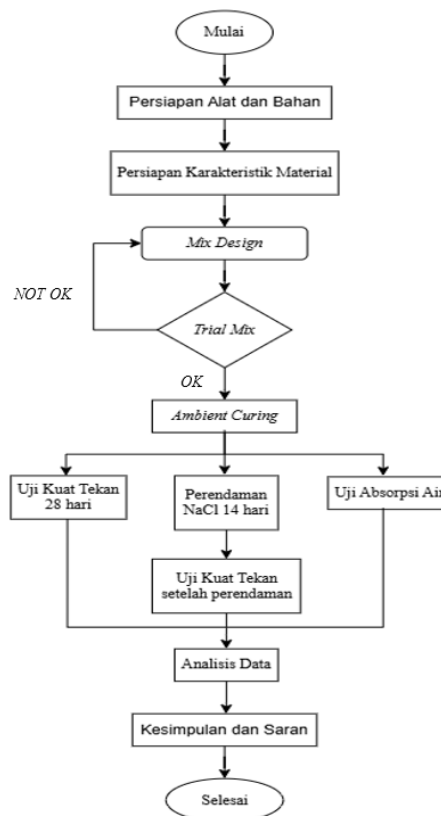
dengan kuat tekan rencana 20 MPa dan dimodifikasi setelah dilakukan beberapa kali *trial mix*. Komposisi campuran rencana yang digunakan per meter kubik disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Campuran Rencana (*Mix Design*) Variasi Na₂SiO₃/NaOH 1:2,5; 1:2,0; 1:1,5

Parameter	Variasi Na ₂ SiO ₃ /NaOH					
	2,5		2,0		1,5	
	Berat Volume (kg/m)	Persentase (%)	Berat Volume (kg/m)	Persentase (%)	Berat Volume (kg/m)	Persentase (%)
Fly Ash	476	17,23	476	17,23	476	17,23
Agregat Halus	554	20,05	554	20,05	554	20,05
Agregat Kasar	1294	46,83	1294	46,83	1294	46,83
NaOH (10M)	120	4,34	140	5,07	168	6,08
Na ₂ SiO ₃	300	10,86	280	10,13	252	9,12
Superplasticizer	19,3	0,7	19,3	0,7	19,3	0,7
Total	2763,3	100	2763,3	100	2763,3	100

2.2. Tahapan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis, dimulai dari persiapan alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian di laboratorium, kemudian dilanjutkan dengan pemeriksaan dan pengujian karakteristik material agregat kasar dan agregat halus untuk mengetahui kesesuaian material terhadap spesifikasi yang digunakan. Selanjutnya dilakukan *mix design* untuk menentukan komposisi campuran yang akan digunakan dalam pembuatan benda uji. Setelah komposisi awal diperoleh, dilakukan *trial mix* atau percobaan campuran untuk mengetahui kesesuaian hasil campuran terhadap kriteria yang telah ditentukan. Apabila hasil *trial mix* belum memenuhi kondisi yang dipersyaratkan, maka dilakukan penyesuaian terhadap komposisi *mix design* hingga diperoleh campuran yang memenuhi kondisi yang ditetapkan. Setelah *mix design* akhir diperoleh, campuran dibuat dan dimasukkan ke dalam cetakan benda uji, kemudian dilakukan perawatan pada suhu ruang (*ambient curing*) selama 28 hari. Benda uji selanjutnya dibagi ke dalam beberapa kelompok pengujian, yaitu pengujian kuat tekan pada umur 28 hari, perendaman dalam larutan NaCl 3,5% selama 14 hari, serta pengujian absorpsi air. Setelah masa perawatan 28 hari, dilakukan pengujian kuat tekan terhadap benda uji untuk mengetahui nilai kuat tekan yang dihasilkan. Untuk benda uji yang direndam dalam larutan NaCl 3,5%, sampel direndam selama 14 hari setelah proses perawatan suhu ruang selama 28 hari, kemudian dilakukan pengujian kuat tekan untuk mengetahui pengaruh paparan larutan garam terhadap kekuatan benda uji. Selanjutnya dilakukan pengujian absorpsi air dengan mengeringkan benda uji menggunakan oven, kemudian merendamnya dalam air dan melakukan penimbangan untuk memperoleh berat kering (*oven dry*) dan berat jenuh permukaan (*saturated surface dry/SSD*) yang digunakan dalam perhitungan nilai absorpsi air. Tahap terakhir adalah analisis data, yaitu seluruh data hasil pengujian dianalisis dan dibandingkan antarvariasi campuran untuk mengetahui pengaruh variasi yang digunakan serta memperoleh kesimpulan dan saran dari penelitian. Diagram alir penelitian secara keseluruhan disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.3. Metode Pengujian

Karakterisasi agregat dilakukan berdasarkan SNI 03-1969-1990, SNI 03-1970-1990, SNI 1971:2011, SNI 03-1968-1990, dan SNI 03-2417-1991 serta standar ASTM yang sepadan, yaitu ASTM C127-01, ASTM C566-97, ASTM C33-99, dan ASTM C131-03. Sementara itu, komposisi kimia *fly ash* ditentukan melalui analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF). Pengujian kuat tekan dilakukan menggunakan compression test machine sesuai SNI 1974:2011. Sebelum pengujian, permukaan benda uji diberi capping menggunakan mortar belerang untuk memastikan distribusi beban aksial yang merata. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari. Perendaman benda uji dalam larutan NaCl sebesar 3,5% per satu (1) liter larutan selama 14 hari yang mendekati kadar air garam laut yang sejalan dengan teori Olivia dan Nikraz (2013), yang selanjutnya diuji kuat tekannya. Pengujian absorpsi air berdasarkan penelitian (Zuaiter et al., 2022), dilakukan pada benda uji yang telah mencapai umur 28 hari, dikeringkan pada oven bersuhu $105 \pm 10^\circ\text{C}$ selama 24 jam, ditimbang untuk mendapat W_{dry} , direndam dalam air biasa selama ± 24 jam dan ditimbang kembali untuk mendapat W_{sat} dengan penentuan persentase absorpsi air setelah perendaman dihitung menggunakan rumus $[(W_{sat} - W_{dry}) / W_{dry}] \times 100\%$.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Pengujian Karakteristik Material

Berdasarkan hasil karakterisasi, agregat halus mempunyai modulus kehalusan sebesar 2,827 yang berada dalam rentang persyaratan SNI 8321:2016, yaitu 2,3–3,1. Agregat halus tersebut memiliki nilai absorpsi sebesar 10,717% dan kadar lumpur sebesar 0,867%, yang masih berada di bawah batas maksimum 5%. Sementara itu, agregat kasar menunjukkan modulus kehalusan sebesar 6,873 dan telah memenuhi rentang 6–7% berdasarkan ASTM C33/C33M-13. Nilai absorpsi agregat kasar sebesar 1,972%, sedangkan nilai keausan berdasarkan pengujian Los Angeles sebesar 33,46%, yang masih berada di bawah batas 50% sesuai SNI 8321:2016. Berdasarkan hasil tersebut, agregat halus dan agregat kasar yang digunakan memenuhi persyaratan sebagai material penyusun beton struktural (Neville, 2011).

Analisis gradasi melalui pengujian saringan menunjukkan bahwa distribusi ukuran butir

agregat halus dan agregat kasar berada dalam batas gradasi yang dipersyaratkan oleh SNI 03-1968-1990. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa susunan butir agregat dapat memberikan distribusi yang sesuai dalam campuran beton, sehingga *fly ash* dan aktivator dapat mengisi ruang antarbutir. Nilai berat jenis (*specific gravity*) agregat halus dan agregat kasar juga berada pada kisaran umum agregat batuan alam. Dengan demikian, agregat yang berasal dari Tateli dan Klabat memenuhi karakteristik yang diperlukan untuk digunakan sebagai material penyusun beton geopolimer.

Pengujian *fly ash* yang dilakukan di UPT Laboratorium Terpadu Universitas Sam Ratulangi, didapat bahwa *fly ash* yang berasal dari PLTU II Amurang tergolong dalam *high calcium fly ash* atau berkalsium tinggi karena memiliki kandungan Kalsium Oksida (Ca) sebesar 12,79%. Material *fly ash* ini termasuk dalam kelas C karena berada di atas 10% menurut standar *ACI Manuel of Concrete Practice 1993 Parts 1 226.3R-3* dan ASTM C-618. Data hasil pengujian *fly ash* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 2. Komposisi Kimia uji XRF fly ash PLTU II Amurang

Senyawa	Persentase (%)	Senyawa	Persentase (%)
SiO ₂	32,30	MgO	7,56
Al ₂ O ₃	13,38	TiO ₂	0,49
Fe ₂ O ₃	8,90	Cr ₂ O ₃	0,07
CaO	12,79	Co	0,07
MnO	0,08	Zn	0,03

3.2. Trial Mix

Dilakukan pengujian *trial mix* untuk mendapatkan *mix design* yang sesuai dengan tetap mengacu pada komposisi campuran beton dari Soentpit et al, 2018. *Trial mix* dilakukan sebanyak 4 (empat) kali untuk menyesuaikan keenceran adukan beton dari *mixer* sampai dimasukkan dalam cetakan silinder. Dari hasil pengujian *trial mix*, didapatkan *mix design* paling optimal rata-rata sebesar 17,5 MPa.

3.3. Berat Volume Beton

Berat volume beton merupakan perbandingan antara berat beton dan volume beton yang dinyatakan dalam rumus berikut.

$$\gamma_c = \frac{W}{V}$$

Keterangan:

γ_c = Berat Volume Beton (kg/m³)

W = Berat Beton (kg)

V = Volume Beton (m³)

Tabel 3. Berat Volume Beton Perawatan Suhu Ruang 28 Hari

Variasi	Berat Volume Rata-rata (Kg)		
	Kuat Tekan	Absorpsi Air	Perendaman NaCl 3,5%
2,5	3,327	3,372	3,516
2	3,336	3,353	3,545
1,5	3,393	3,332	3,523

Tabel 3 menunjukkan hasil penimbangan berat volume beton geopolimer pada tiga kondisi pengujian yang berbeda. Setelah perawatan suhu ruang 28 hari, sebelum pengujian absorpsi air dan sebelum perendaman NaCl. Nilai berat volume yang relative seragam antarvariasi yang berkisar 3,3 – 3,5 kg untuk setiap silinder menunjukkan bahwa proses pemadatan dan pencetakan benda uji berlangsung cukup konsisten pada seluruh variasi rasio aktivator.

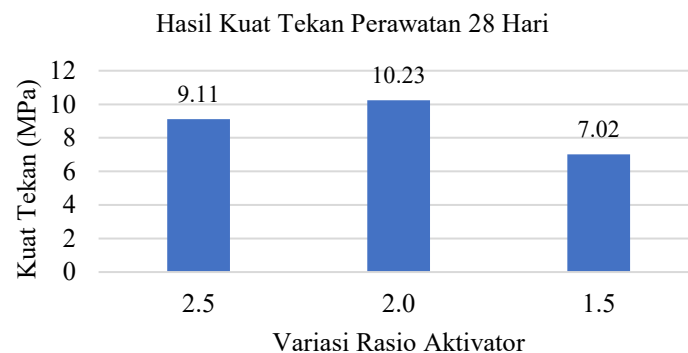
3.4. Pengujian Kuat Tekan

3.4.1. Hasil Pengujian

Pengujian kuat tekan dilakukan terhadap sampel yang telah melalui perawatan suhu ruang selama 28 hari. Berikut pengujian dan perhitungan kuat tekan yang mengacu pada SNI 1974:2011 mendapat hasil pengujian kuat tekan sebagai berikut.

Tabel 4. Hasil Pengujian Kuat Tekan

Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
2,5	9,11
2,0	10,23
1,5	7,02



Gambar 2. Diagram Hasil Kuat Tekan Setelah Ambient Curing 28 Hari

3.4.2. Analisa Pengujian

Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari menunjukkan bahwa variasi rasio aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ memengaruhi kuat tekan beton. Berdasarkan Tabel 8, kuat tekan rata-rata tertinggi diperoleh pada rasio 2,0 sebesar 10,23 MPa, diikuti rasio 2,5 sebesar 9,11 MPa, sedangkan rasio 1,5 menghasilkan kuat tekan terendah sebesar 7,02 MPa.

Peningkatan kuat tekan pada rasio 2,0 menunjukkan bahwa jumlah Na_2SiO_3 dan NaOH berada pada kondisi yang lebih optimum untuk mendukung proses pelarutan (*dissolution*) silika dan alumina dari fly ash sehingga pembentukan gel geopolimer berlangsung lebih efektif. Kondisi tersebut menunjukkan adanya keseimbangan antara kemampuan NaOH melarutkan silika dan alumina dengan suplai silika tambahan dari Na_2SiO_3 . Apabila jumlah silika tersedia berada pada kondisi optimum, proses polikondensasi berlangsung lebih efektif sehingga terbentuk jaringan gel aluminosilikat yang lebih kontinu dan menghasilkan mikrostruktur yang lebih rapat.

Sebaliknya, pada rasio 1,5, jumlah natrium silikat yang lebih rendah diduga menyebabkan pembentukan gel geopolimer kurang optimal. Rasio aktivator 1,5 merupakan yang paling rendah di antara ketiga variasi, sehingga sistem lebih bergantung pada proses pelarutan fly ash oleh NaOH yang berlangsung relatif lebih lambat. Akibatnya, pada umur 28 hari diduga masih terdapat fly ash dan NaOH yang belum sepenuhnya bereaksi, sehingga jaringan gel N-A-S-H yang terbentuk belum optimal dan kuat tekan menjadi paling rendah.

Peningkatan rasio menjadi 2,5 tidak menghasilkan peningkatan kuat tekan. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan natrium silikat yang berlebihan tidak selalu meningkatkan sifat mekanik beton geopolimer. Rasio aktivator yang terlalu tinggi dapat meningkatkan viskositas campuran sehingga proses pencampuran dan homogenisasi menjadi kurang optimal serta berpotensi menghambat pelarutan *precursor* dan menghasilkan perkembangan mikrostruktur yang kurang sempurna. Bertambahnya rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ meningkatkan jumlah spesies silikat terlarut yang berperan dalam pembentukan jaringan gel N-A-S-H. Gel yang berkembang secara optimum menghasilkan matriks yang lebih rapat dengan jumlah pori saling terhubung yang lebih sedikit. Namun, apabila rasio aktivator melebihi kondisi optimum, peningkatan viskositas dapat mengurangi homogenitas campuran sehingga berpotensi meningkatkan porositas dan

memengaruhi kuat tekan, absorpsi air, serta ketahanan terhadap penetrasi ion klorida (Criado et al., 2007; Duxson et al., 2007; Ismail et al., 2014; Luukkonen et al., 2018).

Temuan ini sejalan dengan Ismail et al. (2014) yang menunjukkan bahwa perubahan komposisi aktivator memengaruhi evolusi fase produk reaksi pada sistem *alkali-activated materials*. Pada fly ash yang mengandung kalsium, proses geopolimerisasi tidak hanya menghasilkan gel N-A-S-H, tetapi juga memungkinkan terbentuknya gel C-(A)-S-H maupun gel hibrida N-(C)-A-S-H. Kombinasi fase gel tersebut berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan mekanik apabila terbentuk dalam proporsi yang seimbang. Dengan demikian, rasio aktivator optimum tidak hanya ditentukan oleh jumlah silika yang tersedia, tetapi juga oleh interaksi antarproduk reaksi yang berkembang selama proses *curing* (Chindaprasirt & Rattanasak, 2017; Ismail et al., 2014).

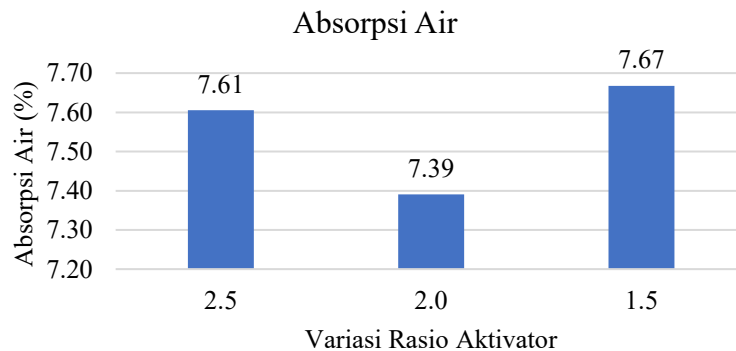
3.5. Pengujian Absorpsi Air

3.5.1. Hasil Pengujian

Melalui perawatan suhu ruang selama 28 hari, di oven selama +/- 24 jam dan direndam selama +/- 24 jam, data diolah dan disajikan dalam tabel sebagai berikut.

Tabel 5. Hasil Absorpsi Air

Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Berat Volume Beton OD Rata-rata	Berat Volume Beton SSD Rata-rata	Absorpsi Air Rata-rata
2,5	3,229	3,474	7,61
2,0	3,213	3,450	7,39
1,5	3,193	3,438	7,67



Gambar 3. Diagram Hasil Absorpsi Air

3.5.2. Analisa Pengujian

Berdasarkan Tabel 5, nilai absorpsi air rata-rata beton geopolimer pada rasio aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,5; 2,0; dan 1,5 berturut-turut sebesar 7,61%; 7,39%; dan 7,67%. Nilai absorpsi terendah diperoleh pada rasio 2,0, sedangkan nilai tertinggi pada rasio 1,5. Meskipun perbedaan antarvariasi relatif kecil, hasil tersebut menunjukkan bahwa perubahan rasio aktivator tetap memengaruhi kemampuan beton geopolimer dalam menyerap air.

Rasio 2,0 diduga menghasilkan proses geopolimerisasi yang lebih optimum sehingga membentuk struktur internal yang lebih rapat dan mengurangi jumlah pori yang saling terhubung. Sebaliknya, pada rasio 1,5 dan 2,5, pembentukan matriks geopolimer diduga belum mencapai kondisi optimum sehingga nilai absorpsi sedikit lebih tinggi. Hasil ini sejalan dengan Olivia dan Nikraz (2012) yang menyatakan bahwa mikrostruktur beton geopolimer yang lebih rapat dapat menghambat masuknya air ke dalam pori-pori material. Pembentukan gel geopolimer yang lebih baik dapat mengurangi volume pori yang dapat ditembus air sehingga nilai absorpsi cenderung lebih rendah. Dengan demikian, absorpsi air dapat digunakan sebagai salah satu indikator untuk mengevaluasi kualitas mikrostruktur beton geopolimer.

Kecenderungan tersebut juga terlihat pada hasil kuat tekan, di mana rasio 2,0 memiliki

absorpsi terendah sekaligus kuat tekan rata-rata tertinggi sebesar 10,23 MPa, sedangkan rasio 1,5 memiliki absorpsi tertinggi dan kuat tekan terendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa kemampuan penyerapan air yang lebih rendah cenderung berkaitan dengan struktur internal yang lebih rapat dan kuat tekan yang lebih tinggi. Menurut Provis dan Van Deventer (2014), penurunan volume pori yang saling terhubung dapat mengurangi kemampuan material menyerap air sekaligus memperlambat transportasi ion agresif ke dalam matriks beton. Dengan demikian, hasil absorpsi pada penelitian ini mengindikasikan bahwa rasio aktivator 2,0 berpotensi memberikan durabilitas yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya.

Hasil tersebut konsisten dengan Luukkonen et al. (2018) yang menjelaskan bahwa kualitas mikrostruktur pada *alkali-activated materials* sangat dipengaruhi oleh keseimbangan komposisi aktivator. Rasio aktivator yang sesuai menghasilkan distribusi gel yang lebih homogen sehingga volume pori efektif menurun, sedangkan proses geopolimerisasi yang kurang sempurna menyebabkan sebagian pori tetap terbuka dan nilai absorpsi meningkat. Nilai absorpsi yang lebih tinggi pada rasio 1,5 turut mengindikasikan bahwa struktur pori material masih relatif terbuka, sejalan dengan dugaan bahwa proses geopolimerisasi pada variasi tersebut belum sepenuhnya tuntas pada umur 28 hari.

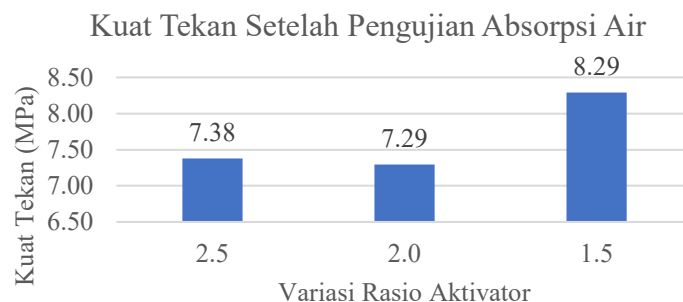
3.6. Kuat Tekan Setelah Absorpsi Air

3.6.1. Hasil Pengujian

Pengujian kuat tekan setelah pengujian absorpsi air dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan beton geopolimer dalam menahan beban tekan setelah benda uji mengalami proses pengeringan di dalam oven, perendaman hingga kondisi jenuh, mencapai kondisi *saturated surface dry (SSD)*.

Tabel 6. Hasil Kuat Tekan setelah Absorpsi Air

Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
2,5	7,38
2,0	7,29
1,5	8,29



Gambar 4. Diagram Kuat Tekan setelah Uji Absorpsi Air

3.6.2. Analisa Pengujian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan rata-rata beton geopolimer pada rasio aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,5;2,0;1,5 berturut turut adalah 7,38 MPa; 7,29 MPa; dan 8,29 MPa. Apabila dibandingkan dengan kuat tekan beton geopolimer umur 28 hari, variasi rasio 2,5 dan 2,0 mengalami penurunan kuat tekan, sedangkan variasi rasio 1,5 mengalami peningkatan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa respons beton geopolimer setelah pengujian absorpsi air tidak seragam pada setiap variasi rasio aktivator. Perbedaan respons tersebut menunjukkan bahwa perubahan kuat tekan setelah pengujian absorpsi air tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan besarnya air yang diserap oleh beton. Olivia dan Nikraz menjelaskan bahwa hubungan antara absorpsi air dan kuat tekan dipengaruhi oleh kualitas mikrostruktur, volume pori yang dapat ditembus air (*apparent volume of permeable voids*), serta parameter campuran geopolimer. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa peningkatan kuat tekan umumnya diikuti oleh

penurunan absorpsi air dan porositas, namun hubungan tersebut tidak selalu bersifat linier karena masih dipengaruhi oleh struktur pori dan komposisi campuran. Pada penelitian ini, rasio aktivator 2,0 memiliki nilai absorpsi air paling rendah, tetapi setelah pengujian absorpsi air tidak lagi menghasilkan kuat tekan tertinggi. Sebaliknya, rasio 1,5 yang memiliki nilai absorpsi tertinggi justru menghasilkan kuat tekan terbesar setelah pengujian absorpsi. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa kondisi jenuh air setelah proses absorpsi bukan merupakan satu-satunya faktor yang memengaruhi kuat tekan beton geopolimer. Kemungkinan terdapat pengaruh lain, seperti perbedaan perkembangan matriks geopolimer, pada masing-masing variasi campuran dan karakteristik mikrostruktur internal yang tidak dapat diamati secara langsung. Perubahan kuat tekan yang tidak seragam setelah pengujian absorpsi air dapat dijelaskan melalui mekanisme geopolimerisasi susulan (*continued/delayed geopolymerization*). Ketersediaan air pada geopolimer berbasis fly ash memungkinkan reaksi dissolution dan polikondensasi terus berlangsung, menghasilkan jaringan gel yang lebih rapat dan kuat tekan yang meningkat signifikan dibandingkan kondisi kekurangan air (Lee et al., 2016). Hal serupa juga ditemukan oleh (Xie & Kayali, 2014) pada geopolimer fly ash yang di-curing pada suhu ruang, di mana kondisi kelembapan setelah pengerasan awal turut memengaruhi perkembangan kekuatan lanjutan. Pada penelitian ini, rasio aktivator 1,5 yang memiliki Na_2SiO_3 paling rendah diduga menyisakan fly ash dan NaOH yang belum bereaksi paling banyak pada umur 28 hari, sehingga ketika benda uji terendam air selama pengujian absorpsi, tersedia ruang reaksi susulan yang lebih besar dibandingkan rasio 2,0 dan 2,5 yang reaksinya sudah relatif lebih matang. Hal ini menjelaskan mengapa rasio 1,5 justru mengalami peningkatan kuat tekan, sementara rasio 2,0 dan 2,5 mengalami penurunan.

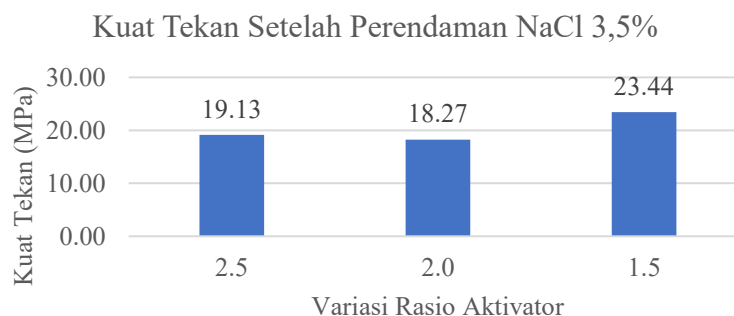
3.7. Kuat Tekan setelah Perendaman NaCl 3,5%

3.7.1. Hasil Pengujian

Pengujian kuat tekan setelah perendaman dalam larutan NaCl 3,5% selama 14 hari dilakukan untuk mengevaluasi perilaku mekanik beton geopolimer setelah terpapar lingkungan yang mensimulasikan kondisi air laut.

Tabel 7. Hasil Kuat Tekan setelah Perendaman NaCl 3,5%

Variasi $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
2,5	19,13
2,0	18,27
1,5	23,44



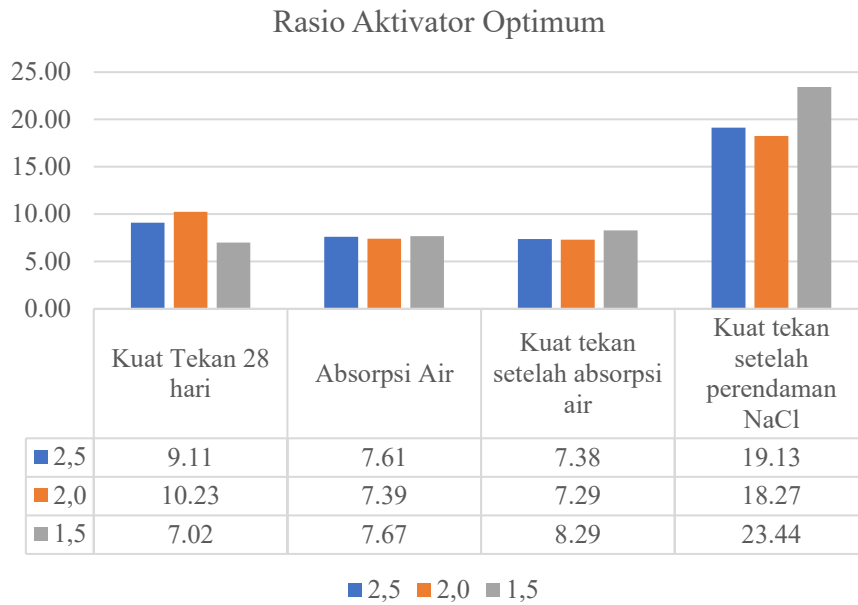
Gambar 5. Diagram Kuat Tekan setelah Perendaman NaCl 3,5%

3.7.2. Analisa Pengujian

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tekan rata-rata beton geopolimer pada variasi rasio aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,5; 2,0; 1,5 berturut-turut adalah 19,13 MPa, 18,27 MPa dan 23,44 MPa. Nilai kuat tekan tertinggi diperoleh pada variasi rasio 1,5; sedangkan nilai terendah diperoleh pada rasio 2,0. Apabila dibandingkan dengan hasil pengujian kuat tekan beton

geopolimer umur 28 hari, seluruh variasi menunjukkan peningkatan kuat tekan setelah perendaman dalam larutan NaCl 3,5%. Peningkatan tersebut berkisar antara sekitar dua sampai tiga kali lipat dibandingkan kuat tekan control. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi penelitian ini, perendaman dalam NaCl tidak diikuti oleh penurunan kuat tekan beton geopolimer sebagaimana yang umum terjadi pada beton semen Portland. Fenomena tersebut masih dapat dijelaskan oleh hasil penelitian terdahulu. Giasuddin, Sanjayan, dan Pathegama Gamage (2013) menyatakan bahwa geopolimer berbasis fly ash yang dicuring pada lingkungan salin justru menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan geopolimer yang dicuring pada air biasa. Melalui pengamatan SEM, EDS dan XRD, penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan tersebut berkaitan dengan berkurangnya pelindian komponen reaktif selama proses curing sehingga pembentukan matriks geopolimer berlangsung lebih baik. Meskipun demikian, hasil penelitian ini tidak dapat diinterpretasikan bahwa larutan NaCl merupakan satu-satunya penyebab peningkatan kuat tekan. Benda uji control diuji pada umur 28 hari, sedangkan benda uji setelah perendaman NaCl diuji pada umur yang lebih tua setelah menjalani proses perendaman selama 14 hari. Pada beton geopolimer berbasis fly ash yang mengalami *ambient curing*, perkembangan reaksi geopolimerisasi masih dapat berlangsung setelah umur 28 hari sehingga kuat tekan masih berpotensi meningkat. Oleh karena itu, peningkatan kuat tekan yang diperoleh pada penelitian ini kemungkinan merupakan hasil kombinasi antara perkembangan umur dan kondisi perendaman. Jika dibandingkan antarvariasi, rasio aktivator 1,5 menghasilkan kuat tekan tertinggi setelah perendaman NaCl, meskipun pada pengujian kuat tekan umur 28 hari variasi tersebut memiliki kuat tekan terendah. Hal ini menunjukkan bahwa reaksi beton geopolimer terhadap lingkungan yang mengandung klorida tidak selalu mengikuti urutan kuat tekan awal. Wan, X., et al. (2023) menyatakan ketahanan beton geopolimer terhadap lingkungan yang mengandung klorida dipengaruhi oleh mikrostruktur, komposisi campuran, karakteristik pori, serta mekanisme transport ion klorida di dalam material. Dengan demikian, setiap variasi campuran dapat memberikan reaksi yang berbeda terhadap paparan klorida. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan penelitian Olivia dan Nikraz (2011) mengenai beton geopolimer fly ash pada lingkungan air laut, yang menyatakan bahwa perendaman kontinu dalam larutan NaCl 3,5% tidak menyebabkan penurunan kuat tekan yang signifikan pada beton geopolimer. Penulis menjelaskan bahwa perubahan porositas dan berat benda uji setelah paparan air laut relative kecil, sehingga performa mekanik beton geopolimer tetap terjaga. Temuan tersebut menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis fly ash memiliki ketahanan yang baik terhadap lingkungan yang mengandung klorida dibandingkan beton berbasis semen Portland. Selain faktor ketahanan geopolimer terhadap ion klorida sebagaimana dibahas sebelumnya, besarnya peningkatan kuat tekan pada penelitian ini masing-masing sebesar 110% (rasio 2,5), 78% (rasio 2,0), dan 223% (rasio 1,5) dibandingkan kuat tekan kontrol, juga dapat dijelaskan melalui mekanisme geopolimerisasi susulan akibat tersedianya air tambahan selama 14 hari perendaman (Lee et al., 2016; Xie & Kayali, 2014). Pola peningkatan tersebut konsisten dengan urutan kuat tekan kontrol pada Tabel 4.5: variasi dengan kuat tekan awal terendah (rasio 1,5) memiliki presursor tak bereaksi paling banyak sehingga mengalami persentase kenaikan tertinggi, sedangkan variasi dengan kuat tekan awal tertinggi (rasio 2,0) yang reaksinya sudah relatif lebih tuntas pada 28 hari mengalami kenaikan paling kecil. Selain itu, kandungan kalsium tinggi pada fly ash yang digunakan dalam penelitian ini senilai 12,79% turut memungkinkan pembentukan gel tambahan berupa C-(A)-S-H, yang reaksinya juga dapat terus berlangsung seiring ketersediaan air selama perendaman (Ismail et al., 2014). Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa beton geopolimer berbasis fly ash pada penelitian ini tetap menunjukkan performa mekanik yang baik setelah perendaman dalam larutan NaCl 3.5% selama 14 hari. Namun, karena penelitian ini tidak menguji lebih dalam hasil sampel yang dibuat seperti SEM, XRD maupun analisis porositas, mekanisme peningkatan kuat tekan tidak dapat dipastikan secara langsung. Oleh sebab itu, interpretasi hasil dibatasi pada hubungan yang teramati selama penelitian dan didukung oleh temuan penelitian terdahulu.

3.8. Rasio Aktivator Optimum



Gambar 6. Diagram Parameter Pengujian

Penentuan rasio aktivator optimum pada penelitian ini dilakukan berdasarkan keseluruhan hasil pengujian, meliputi kuat tekan umur 28 hari, absorpsi air, kuat tekan setelah pengujian absorpsi air, dan kuat tekan setelah perendaman NaCl 3,5% selama 14 hari. Berdasarkan kuat tekan umur 28 hari, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,0 menghasilkan nilai tertinggi sebesar 10,23 MPa, diikuti rasio 2,5 sebesar 9,11 MPa dan rasio 1,5 sebesar 7,02 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa rasio 2,0 memberikan kinerja awal yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Hasil tersebut juga didukung oleh absorpsi air, di mana rasio 2,0 menghasilkan nilai terendah sebesar 7,391%, sedangkan rasio 2,5 dan 1,5 masing-masing sebesar 7,605% dan 7,668%. Nilai absorpsi yang lebih rendah menunjukkan kecenderungan struktur internal yang lebih rapat. Hubungan antara rendahnya absorpsi air dan meningkatnya kualitas mikrostruktur beton geopolimer telah dilaporkan pada penelitian terdahulu, yang menyatakan bahwa penurunan porositas umumnya diikuti oleh peningkatan sifat mekanik material (Olivia & Nikraz, 2012; Provis & van Deventer, 2014).

Namun, setelah pengujian absorpsi air dan perendaman NaCl 3,5%, urutan kuat tekan berubah dan rasio 1,5 menghasilkan nilai tertinggi. Hasil ini tidak secara langsung menunjukkan bahwa rasio 1,5 merupakan rasio optimum karena kedua pengujian dilakukan pada kondisi yang berbeda dari pengujian kontrol. Benda uji setelah absorpsi berada dalam kondisi *saturated surface dry*, sedangkan benda uji setelah perendaman NaCl diuji pada umur yang lebih tua. Selain itu, respons beton geopolimer terhadap lingkungan klorida dipengaruhi oleh komposisi campuran, karakteristik pori, mikrostruktur, metode curing, dan perkembangan reaksi geopolimerisasi, sehingga perubahan kuat tekan tidak dapat diatribusikan hanya pada pengaruh larutan NaCl (Giasuddin et al., 2013; Wan et al., 2023).

Perbedaan hasil antarvariasi juga diduga berkaitan dengan perbedaan jumlah Na_2SiO_3 dan perkembangan reaksi geopolimerisasi. Rasio 1,5 memiliki jumlah Na_2SiO_3 lebih rendah sehingga diduga masih terdapat material yang belum bereaksi sempurna pada umur 28 hari. Adanya air tambahan selama pengujian dapat memungkinkan berlangsungnya reaksi geopolimerisasi susulan, sehingga kuat tekan rasio 1,5 dapat meningkat lebih besar. Sebaliknya, rasio dengan jumlah Na_2SiO_3 lebih tinggi diduga mengalami perkembangan reaksi yang lebih cepat pada tahap awal, sehingga perkembangan kekuatannya pada tahap berikutnya tidak selalu sama. Kandungan CaO sebesar 12,79% pada fly ash yang digunakan juga memungkinkan terbentuknya gel tambahan berupa C-(A)-S-H yang dapat terus berkembang selama tersedia air. Kondisi tersebut dapat menjelaskan mengapa hasil kuat tekan setelah perlakuan tidak selalu mengikuti urutan kuat tekan umur 28 hari (Lee et al., 2016; Xie & Kayali, 2014; Ismail et al., 2014).

Meskipun rasio 1,5 menghasilkan kuat tekan tertinggi setelah pengujian absorpsi air

maupun perendaman NaCl, hasil tersebut tidak dijadikan dasar utama penentuan rasio optimum karena diperoleh pada kondisi dan umur benda uji yang berbeda serta setelah adanya paparan air tambahan yang memungkinkan berlangsungnya reaksi lanjutan. Oleh karena itu, penentuan rasio optimum mengacu pada kondisi pengujian yang setara dan terkontrol antarvariasi, yaitu kuat tekan dan absorpsi air umur 28 hari. Berdasarkan kedua parameter tersebut, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,0 menunjukkan kinerja paling konsisten dan ditetapkan sebagai rasio optimum pada penelitian ini.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, rasio aktivator $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ memengaruhi sifat mekanik dan karakteristik durabilitas beton geopolimer berbasis fly ash. Pada umur 28 hari, rasio 2,0 menghasilkan kuat tekan tertinggi sebesar 10,23 MPa dan absorpsi air terendah sebesar 7,391%, dibandingkan rasio 2,5 sebesar 9,11 MPa dan 7,605% serta rasio 1,5 sebesar 7,02 MPa dan 7,668%. Setelah pengujian absorpsi air, kuat tekan rasio 2,5 dan 2,0 menurun menjadi 7,38 MPa dan 7,29 MPa, sedangkan rasio 1,5 meningkat menjadi 8,29 MPa. Setelah perendaman NaCl 3,5% selama 14 hari, seluruh variasi mengalami peningkatan kuat tekan, yang diduga dipengaruhi oleh perbedaan tingkat kematangan reaksi geopolimerisasi, umur benda uji, dan kondisi pengujian. Berdasarkan hasil pada kondisi pengujian yang setara pada umur 28 hari, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2,0 ditetapkan sebagai rasio optimum karena menghasilkan kombinasi kuat tekan tertinggi dan absorpsi air terendah.

5. Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ di sekitar rasio 2,0 dengan interval lebih kecil, misalnya 1,8; 2,0; 2,2 atau 1,9; 2,0; 2,1, agar rasio optimum dapat ditentukan lebih teliti. Pengujian durabilitas juga disarankan dengan variasi lama perendaman dalam larutan NaCl 3,5%, misalnya 28, 56, dan 90 hari, untuk mengetahui perkembangan sifat mekanik dan ketahanan terhadap ion klorida dalam jangka lebih panjang. Selain itu, pengujian mikrostruktur dapat dilakukan untuk menganalisis perubahan struktur internal akibat variasi rasio aktivator dan perendaman NaCl.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada PLTU II Sulawesi Utara (Amurang) atas izin pengambilan *fly ash* yang digunakan dalam penelitian ini, serta kepada Laboratorium Rekayasa Struktur dan Material, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sam Ratulangi Manado, atas fasilitas dan bantuan teknis selama pelaksanaan pengujian. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing dan penguji atas arahan dan masukan selama proses penelitian, serta kepada rekan-rekan mahasiswa Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi yang telah membantu pelaksanaan penelitian, khususnya selama proses pengujian di laboratorium, hingga penelitian ini dapat diselesaikan.

Referensi

- Bakharev, T. (2005). *Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium sulfate solutions. Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233–1246. doi:10.1016/j.cemconres.2004.09.002
- Chindaprasart, P., & Rattanasak, U. (2017). *Characterization of the high-calcium fly ash geopolymer mortar with hot-weather curing systems for sustainable application. Advanced Powder Technology*, 28(9), 2317–2324. doi:10.1016/j.apt.2017.06.013
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2007). *Alkali activation of fly ash: Effect of the $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ ratio. Part I: FTIR study. Microporous and Mesoporous Materials*, 106(1–3), 180–191. doi:10.1016/j.micromeso.2007.02.055
- Davidovits, J. (1991). *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *Geopolymer technology: The current state of the art. Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. doi:10.1007/s10853-006-0637-z
- Ghafoor, M. T., Khan, Q. S., Qazi, A. U., Sheikh, M. N., & Hadi, M. N. S. (2021). *Influence of alkaline aktivators on the mechanical properties of fly ash based geopolymer concrete cured at ambient temperature. Construction and Building Materials*, 273, 121752. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121752
- Giasuddin, H. M., Sanjayan, J. G., & Ranjith, P. G. (2013). *Strength of geopolymer cured in saline water*

- in ambient conditions. *Fuel*, 107, 34–39. doi:10.1016/j.fuel.2013.01.035
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. Curtin University of Technology.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M. J., & Rangan, B. V. (2005). *Fly ash-based geopolymer concrete*. *Australian Journal of Structural Engineering*, 6(1), 77–86. doi:10.1080/13287982.2005.11464946
- Ismail, I., Bernal, S. A., Provis, J. L., San Nicolas, R., Hamdan, S., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Modification of phase evolution in alkali-activated blast furnace slag by the incorporation of fly ash*. *Cement and Concrete Composites*, 45, 125–135. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.09.006
- Lee, S., van Riessen, A., & Chon, C. M. (2016). *Benefits of sealed-curing on compressive strength of fly ash-based geopolymers*. *Materials*, 9(7), 598. doi:10.3390/ma9070598
- 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. doi:10.1016/j.cemconres.2017.10.001
- Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., Bnhussain, M., Zarina, Y., & Rafiza, A. R. (2012). *Correlation between $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio and fly ash/alkaline aktivator ratio to the strength of geopolymer*. *Advanced Materials Research*, 341–342, 189–193. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.341-342.189
- Olivia, M., & Nikraz, H. (2013). *Properties of fly ash geopolymer concrete in seawater environment*. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 4(2), 63–72.
- Pasupathy, K., Sanjayan, J., Rajeev, P., & Law, D. W. (2021). *The effect of chloride ingress in reinforced geopolymer concrete exposed in the marine environment*. *Journal of Building Engineering*, 39, 102281. doi:10.1016/j.jobbe.2021.102281
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali activated materials: State-of-the-art report*, RILEM TC 224-AAM. Springer.
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009). *Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer*. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073–1078. doi:10.1016/j.mineng.2009.03.022
- Shi, X., Xie, N., Fortune, K., & Gong, J. (2012). *Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview*. *Construction and Building Materials*, 30, 125–138. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.038
- Soenjoto, B. J., Wallah, S. E., & Manalip, H. (2018). *Modulus elastisitas beton geopolymer berbasis fly ash dari PLTU Amurang*. *Jurnal Sipil Statik*.
- Sumajouw, D. M. J., Hardjito, D., Wallah, S. E., & Rangan, B. V. (2007). *Fly ash-based geopolymer concrete: Study of slender reinforced columns*. *Journal of Materials Science*, 42(9), 3124–3130. doi:10.1007/s10853-006-0523-8
- Xie, J., & Kayali, O. (2014). *Effect of initial water content and curing moisture conditions on the development of fly ash-based geopolymers in heat and ambient temperature*. *Construction and Building Materials*, 67, 20–28. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.047
- Zuaiter, M., El-Hassan, H., El-Maadawy, T., & El-Ariss, B. (2022). *Properties of slag-fly ash blended geopolymer concrete reinforced with hybrid glass fibers*. *Buildings*, 12(8), 1114. doi:10.3390/buildings12081114