

PENGARUH VARIASI MOLARITAS NaOH TERHADAP SIFAT MEKANIS, POROSITAS, DAN PERMEABILITAS PADA BETON POROUS GEOPOLIMER

Muhammad Ridho Alpajri^{1*}, Bimo Brata Adhitya¹, Fitria Putri Lintang Sari¹

¹Teknik Sipil, Universitas Sriwijaya, Palembang

*Corresponding author e-mail: ridhoalpajri3@gmail.com

ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi molaritas NaOH (13M, 14M, 15M, 16M, 17M) terhadap sifat mekanik, porositas, dan permeabilitas beton porous geopolimer berbasis *fly ash*. Metode eksperimental melibatkan pengecoran sampel silinder ($\varnothing 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) menggunakan agregat kasar (9,5–12,5 mm), rasio aktivator alkali/*fly ash* 0,45, dan pengawetan oven pada suhu 80°C selama 24 jam. Hasil menunjukkan bahwa 15M NaOH menghasilkan kekuatan tekan optimal 9,10 MPa (28 hari) dan kekuatan tarik belah 3,60 MPa (28 hari), dengan porositas 28,0340% dan permeabilitas 1,4147 cm/s. Peningkatan molaritas NaOH meningkatkan kepadatan matriks geopolimer karena peningkatan reaktivitas silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) dalam *fly ash*. Namun, molaritas >15M mengurangi kekuatan tekan karena pemisahan alkali. Nilai permeabilitas memenuhi standar ACI 522R-10 (0,14–1,22 cm/s), sementara porositas tetap dalam kisaran yang dapat diterima (15–35%). Studi ini merekomendasikan 15M NaOH untuk aplikasi beton porous geopolimer yang berkelanjutan dalam infrastruktur.

Kata Kunci: Beton Porous Geopolimer, Molaritas NaOH, Kekuatan Tekan, Permeabilitas, Porositas

ABSTRACT: The Effect of NaOH Molarity Variations on The Mechanical Properties, Porosity, and Permeability of Porous Geopolymer Concrete. This study aims to analyze the effect of NaOH molarity variation (13M, 14M, 15M, 16M, 17M) on the mechanical properties, porosity, and permeability of fly ash-based geopolymer porous concrete. The experimental method involved casting cylindrical samples ($\varnothing 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$) using coarse aggregates (9,5–12,5 mm), an alkali activator/fly ash ratio of 0,45, and oven curing at 80°C for 24 hours. Results indicated that 15M NaOH yielded optimal compressive strength of 9,10 MPa (28 days) and split tensile strength of 3,60 MPa (28 days), with a porosity of 28,0340% and permeability of 1,4147 cm/s. Increased NaOH molarity enhanced geopolymer matrix density due to improved reactivity of silica (SiO_2) and alumina (Al_2O_3) in fly ash. However, molarities >15M reduced compressive strength due to alkali segregation. Permeability values met ACI 522R-10 standards (0,14–1,22 cm/s), while porosity remained within the acceptable range (15–35%). This study recommends 15M NaOH for sustainable geopolymer porous concrete applications in infrastructure.

Keywords: Geopolymer Porous Concrete, NaOH Molarity, Compressive Strength, Permeability, Porosity

1 Pendahuluan

Beton merupakan material utama dalam konstruksi karena kuat, ekonomis, dan tahan terhadap suhu ekstrem. Namun, penggunaannya yang masif terutama dalam bentuk permukaan kedap air seperti aspal mengurangi lahan resapan dan memperparah limpasan air, berpotensi menyebabkan banjir. Beton porous hadir sebagai solusi dengan porositas dan permeabilitas tinggi yang memungkinkan air meresap ke tanah, cocok untuk trotoar dan lahan parkir. Meski demikian, efektivitasnya memerlukan perencanaan drainase yang matang untuk mencegah kejenuhan tanah atau erosi. Di sisi lain, produksi semen yang merupakan komponen utama beton telah menyumbang sekitar 7% emisi CO_2 global, mendorong pengembangan alternatif

berkelanjutan seperti beton geopolimer. Material ini memanfaatkan *fly ash* (limbah batu bara) yang diaktivasi larutan alkali (NaOH dan Na_2SiO_3) untuk membentuk matriks polimer, sehingga mengurangi jejak karbon.

Molaritas NaOH sangat menentukan reaktivitas aktivasi *fly ash* dan berpengaruh pada sifat mekanik beton. Meskipun penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa 15 M menghasilkan kinerja optimum pada beton geopolimer konvensional, nilai ini belum divalidasi pada beton porous, yang struktur berporinya dapat mengubah distribusi dan efisiensi reaksi geopolimerisasi, sehingga berpotensi menggeser molaritas optimal.

2 Tinjauan Pustaka

Penggunaan beton konvensional, terutama pada lahan parkir beraspal, mengurangi resapan air dan berpotensi menyebabkan banjir. Sebagai solusi, beton porous dikembangkan dengan rongga saling terhubung akibat minimnya agregat halus, menghasilkan porositas 15–35%, permeabilitas 2–12 mm/s, kuat tekan 5–25 MPa, dan slump mendekati nol. Sejalan dengan upaya pengurangan emisi karbon karena produksi semen menyumbang sekitar 7% CO₂ global, beton geopolimer hadir sebagai alternatif ramah lingkungan yang memanfaatkan bahan limbah kaya terhadap silika dan alumina, seperti *fly ash* yang diaktivasi larutan alkali.

Beton porous geopolimer menggabungkan keunggulan keduanya, yaitu struktur beton yang berpori untuk drainase dan matriks geopolimer yang berkelanjutan. Material ini memiliki porositas tinggi, kepadatan rendah (1420–1840 kg/m³), dan kuat tekan hingga 13,6 MPa, dengan kinerjanya sangat dipengaruhi oleh jenis agregat dan molaritas NaOH.

2.1 Material Penyusun *Porous Geopolymer Concrete*

2.1.1 Fly Ash

Fly ash adalah limbah batu bara berbentuk halus yang bersifat pozzolan karena kaya silika (SiO₂) dan alumina (Al₂O₃), sehingga dapat menggantikan semen dan bereaksi dengan aktivator alkali membentuk pengikat geopolimer.

2.1.2 Agregat Kasar

Agregat kasar berupa kerikil berukuran 4,8–40 mm, harus bersih dari bahan organik, memiliki daya ikat baik dengan matriks semen, dan umumnya berasal dari batu pecah alam. Sifatnya memengaruhi kekuatan, durabilitas, dan ketahanan cuaca beton.

2.1.3 Alkali Aktivator

Alkali aktivator umumnya berupa campuran NaOH dan Na₂SiO₃, yang melarutkan silikon dan aluminium dari *fly ash* untuk membentuk jaringan geopolimer. Rasio massa antara keduanya terbukti memengaruhi kuat tekan beton geopolimer [1].

2.1.4 Akuades

Akuades (air suling) digunakan sebagai pelarut karena bebas zat pengotor. Jumlahnya menentukan konsentrasi akhir NaOH. Semakin sedikit akuades, semakin tinggi molaritas larutan.

2.2 Faktor yang Mempengaruhi Campuran *Porous Geopolymer Concrete*

2.2.1 Molaritas Larutan Natrium Hidroksida

Molaritas NaOH memengaruhi kinerja beton geopolimer. Sata [2] melaporkan kuat tekan optimum pada beton porous yaitu pada variasi 15 M, sedangkan Abdullah [3] menemukan puncak kuat tekan beton geopolimer pada variasi 12 M. Konsentrasi lebih tinggi justru menurunkan kuat tekan akibat peningkatan viskositas dan penurunan *workability*.

2.2.2 Rasio Alkali Aktivator (Na₂SiO₃/NaOH)

Rasio Na₂SiO₃/NaOH berpengaruh signifikan terhadap kuat tekan, tergantung pada tipe *fly ash* [4]. Honny [5] menunjukkan bahwa rasio 2,5 menghasilkan kuat tekan tertinggi pada *fly ash* tipe C, dengan peningkatan seiring umur beton dan *curing* termal (60 °C, 24 jam), karena percepatan reaksi geopolimerisasi.

2.2.3 Rasio Alkali Aktivator dan *Fly Ash* (AL/FA)

Kupaei [6] melaporkan bahwa kuat tekan maksimum didapatkan sebesar 30,42 MPa pada usia 28 hari dengan rasio AL/FA = 0,45. Rasio lebih tinggi dapat menurunkan kuat tekan akibat kelebihan air yang mengurangi densitas. Arafa [7] menambahkan bahwa peningkatan rasio ini juga menurunkan permeabilitas karena pasta geopolimer lebih banyak mengisi pori.

2.2.4 Rasio *Fly Ash* dan Agregat (FA/CA)

Fly ash berfungsi sebagai prekursor pengikat yang peningkatan proporsinya memperkuat matriks, namun keseimbangan dengan agregat kasar diperlukan untuk menjaga kekuatan struktural bila kapasitas pengikat telah optimal [7].

2.3 Pengujian Mikrostruktur *Fly Ash*

2.3.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF adalah metode analisis untuk mengidentifikasi jenis unsur (kualitatif) dan menentukan komposisi unsur (kuantitatif) dalam material berdasarkan sinar-X yang dipancarkan setelah iradiasi sinar-X berenergi tinggi.

2.3.2 X-Ray Diffraction (XRD)

XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristalin dan amorf dalam material melalui pola difraksi

sinar-X yang dihasilkan saat sinar-X diarahkan ke spesimen padat atau serbuk, memberikan informasi tentang reaktivitas material.

2.3.3 Scanning Electron Microscope (SEM)

SEM memanfaatkan berkas elektron untuk menghasilkan gambar permukaan material dengan pembesaran tinggi, memungkinkan pengamatan struktur mikro dan morfologi permukaan secara detail.

2.4 Perawatan atau *Curing* Beton

Curing bertujuan memaksimalkan kekuatan dan kinerja beton geopolimer, umumnya melalui pemanasan. Suhu terlalu rendah (<50 °C) menghambat polikondensasi, sedangkan suhu terlalu tinggi (>90 °C) menyebabkan pori besar dan penurunan kuat tekan [8]. Oleh karena itu, proses *curing* harus dikontrol secara ketat.

2.5 Perawatan atau *Curing* Beton

2.5.1 Workability

Workability adalah tingkat kemudahan pengerjaan campuran beton tanpa adanya peristiwa segregasi atau terpisahnya berbagai bahan campuran beton porous geopolimer, seperti agregat kasar, alkali aktivator, dan pasta pengikat berupa *fly ash* [9].

2.5.2 Kuat Tekan (*Compressive Strength*)

Pengujian kuat tekan beton dapat dijadikan parameter dasar untuk melihat tingkat keberhasilan pembuatan campuran beton. Pengujian kuat tekan beton berfungsi untuk mengidentifikasi karakteristik dan perubahannya terhadap tekan berdasarkan pembebanan aktual yang diberikan [8]. Kuat tekan beton dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Keterangan:

f_c' = Kuat tekan beton (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas bidang tekan (mm²)

2.5.3 Kuat Tarik Belah (*Split Tensile Strength*)

Kuat tarik belah beton merupakan suatu parameter pengujian paling dasar dengan menarik beton untuk mengetahui suatu reaksi terhadap kuat tarikan dan sejauh mana deformasi yang terjadi pada beton tersebut

[10]. Berdasarkan ASTM C496/496M-11, perhitungan kekuatan tarik beton dilakukan menggunakan rumus yang tercantum pada persamaan:

$$T = \frac{2P}{\pi \times l \times d} \quad (2)$$

Keterangan:

T = Kuat tarik belah (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

l = Panjang benda uji (mm)

d = Diameter (mm)

2.5.4 Porositas (*Porosity*)

Porositas (*porosity*) adalah suatu perbandingan antara volume pori terhadap total volume di dalam sampel yang dicapai karena rongga yang saling berhubungan. Rumus mengenai porositas dapat dilihat pada persamaan:

$$p = \left[1 - \left(\frac{W_1 - W_2}{\rho_w V} \right) \right] \times 100\% \quad (3)$$

Keterangan:

P = Porositas (%)

W₁ = Beban sampel kering (kg)

W₂ = Berat sampel direndam air (kg)

V = Volume sampel (m³)

ρ_w = Massa jenis air (kg/m³)

2.5.5 Permeabilitas (*Permeability*)

Permeabilitas (*permeability*) mengacu pada kemampuan beton porous geopolimer untuk meloloskan air, di mana semakin mudah air menembus beton, semakin tinggi nilai permeabilitasnya. Beberapa sifat fisik beton yang memengaruhi permeabilitas meliputi ukuran agregat, rasio *fly ash* terhadap agregat, porositas, kadar alkali, dan bahan dasar. Koefisien permeabilitas dapat dihitung memakai persamaan Hukum Darcy:

$$K_c = \frac{q \times L}{A \times h \times t} \quad (4)$$

Keterangan:

K_c = Kuat tekan beton (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas bidang tekan (mm²)

q = Volume air yang lolos sampel (mm²)

L = Tinggi spesimen sampel silinder (mm²)

h = Panjang spesimen dan volume air (mm)

t = Waktu untuk aliran air (detik)

3 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental yang berfokus pada beton porous geopolimer dengan *fly ash* sebagai prekursor. Alur penelitian ini menggunakan diagram alir sebagai pedoman penelitian yang menguraikan tahapan-tahapan penelitian dari awal hingga akhir.

Bahan utama beton porous geopolimer dalam penelitian ini meliputi *fly ash*, larutan alkali aktivator (Na_2SiO_3 dan NaOH), agregat kasar, dan akuades. Peralatan yang digunakan mencakup timbangan, gelas beker, pan, molen, bekisting, sekop, tongkat penumbuk, oven, *universal testing machine* (UTM), dan *falling head permeameter* untuk proses pencampuran, pencetakan, *curing*, dan pengujian.

4 Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menganalisis pengaruh variasi molaritas NaOH terhadap sifat mekanik, porositas, dan permeabilitas pada beton porous geopolimer.

4.1 Hasil Pengujian Agregat Kasar

4.1.1 Pengujian Berat Volume Agregat Kasar

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Berat Volume Agregat Kasar

Uraian	Pengujian Penusukan		Pengujian Lepas	
	I	II	I	II
Volume Silinder	9,935	9,935	9,935	9,935
Berat Silinder (A)	8,340	8,340	8,340	8,340
Berat Silinder + Agregat (B)	21,360	21,590	20,510	20,510
Berat Sampel (B-A)	13,020	13,250	12,170	12,170
Berat Volume = $\frac{\text{Berat Sampel}}{\text{Volume Silinder}}$	1,311	1,334	1,225	1,225
Rata-rata	1,322		1,225	

Berat volume agregat kasar yang diuji berada dalam kisaran 1,4–1,7 g/cm^3 , sesuai dengan SNI 03-4804-1998, sehingga memenuhi syarat standar.

4.1.2 Pengujian *Specific Gravity* dan Penyerapan Air Agregat Kasar

Hasil pengujian menunjukkan berat kering 1,599%, berat agregat jenuh (SSD) 1,822%, berat agregat basah 2,058%, dan penyerapan air 15,046%. Menurut SNI 03-1969-2016, nilai penyerapan air harus

di atas 3%. Hasil ini mengindikasikan bahwa agregat mampu menyerap air

Tabel 4.2 Hasil Pengujian *Specific Gravity* dan Penyerapan Agregat Kasar

Uraian	Pengujian	
	I	II
Berat sampel SSD (W1)	5020	5830
Berat sampel dalam Air (W2)	2420,2	2426,8
Berat sampel kering (W3)	4708	4722
<i>Bulk Specific Gravity (dry condition)</i> $\frac{W3}{W1-W2}$	1,811	1,388
<i>Apperent Specific Gravity</i> $\frac{W3}{W3-W2}$	2,058	2,057
<i>Bulk Specific Gravity (SSD condition)</i> $\frac{W1}{W1-W2}$	1,931	1,713
<i>Percentage of water absorption</i> $\frac{W1-W3}{W3} \times 100$	6,627	23,465
Rata-rata		
<i>Bulk Specific Gravity (dry condition)</i>	1,599	
<i>Apperent Specific Gravity</i>	2,058	
<i>Bulk Specific Gravity (SSD condition)</i>	1,822	
<i>Percentage of water absorption</i>	15,046	

4.1.3 Pengujian Kadar Air Agregat Kasar

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kadar Air Agregat Kasar

Uraian	Pengujian	
	I	II
Berat pan (W1)	594	598
Berat pan+ agregat sebelum di oven (W2)	1594	1598
Berat agregat sebelum di oven (W3) = (W2-W1)	1000	1000
Berat pan + agregat setelah di oven (W4)	1580	1584
Berat agregat setelah dioven W5 = W4-W1	986	986
Persentase kadar air $= \frac{W3-W5}{W5} \times 100\%$	1,41988	1,41988
Rata-rata	1,420	

Berdasarkan standar ASTM C556-97, kadar air pada agregat kasar harus berada dalam kisaran 0% hingga 3%. Dengan demikian, rata-rata hasil pengujian menunjukkan bahwa agregat kasar yang digunakan telah memenuhi standar yang berlaku.

4.1.4 Pengujian Kadar Lumpur Agregat Kasar

Tabel 4.4 Hasil Uji Kadar Lumpur Agregat Kasar

Uraian	Satuan	Pengujian Lepas	
		I	II
Berat kering + wadah (A)	gram	2482	2488
Berat wadah (B)	gram	982	988
Berat benda uji kering Awal (C) = (B-A)	gram	1500	1500
Berat benda uji kering sesudah cuci+wadah (D)	gram	2432	2432
Berat benda uji kering setelah pencucian (E)	gram	1450	1444
Persen bahan lolos saringan no. 200 (%Lolos) = ((C-E)/E)x100	%	3,333	3,733
Hasil rata-rata	%	3,533	

Hasil uji kadar lumpur menunjukkan rata-rata 3,533%, melebihi standar kurang dari 1%. Kandungan lumpur tinggi ini dapat menurunkan kualitas beton. Solusi dilakukan dengan mencuci ulang agregat dan menjemurnya hingga kondisi jenuh permukaan tercapai.

4.2 Hasil Pemeriksaan Fly Ash

4.2.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

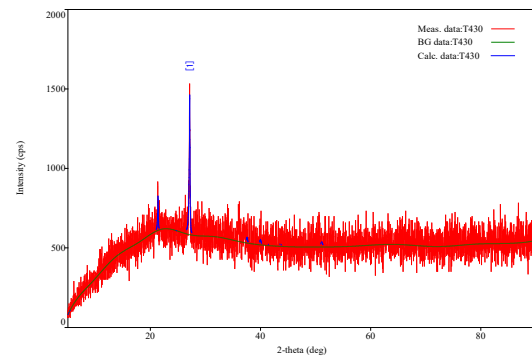
Berdasarkan Tabel 4.5, kadar CaO dalam fly ash adalah 4,204%. Dengan demikian, fly ash memenuhi kriteria untuk diklasifikasikan sebagai fly ash kelas F sesuai standar yang berlaku.

Tabel 4.5 Hasil Pemeriksaan X-Ray Fluorescence

Parameter	Satuan	Hasil Analisa (%)
SiO ₂	%	53,622
Al ₂ O ₃	%	27,061
Fe ₂ O ₃	%	6,110
Na ₂ O	%	4,327
CaO	%	4,204
MgO	%	1,639
K ₂ O	%	1,015
TiO ₂	%	0,871
SO ₃	%	0,766
P ₂ O ₅	%	0,321
Mn ₃ O ₄	%	0,063

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

4.2.2 X-Ray Diffraction (XRD)

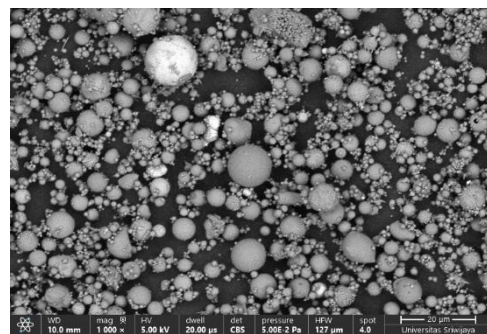


Gambar 4.1 Hasil Pemeriksaan X-Ray Diffraction (XRD)

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Dari gambar tersebut, terlihat bahwa puncak kristalin pada fly ash sangat sedikit, yaitu pada sudut difraksi 27,12° dengan nilai intensitas mencapai 1486,56 cps. Hal ini mengindikasikan bahwa fly ash yang dipakai memiliki struktur amorf yang cenderung lebih reaktif sehingga lebih cepat larut dalam larutan alkali aktivator.

4.2.3 Scanning Electron Microscope Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (SEM-EDS)

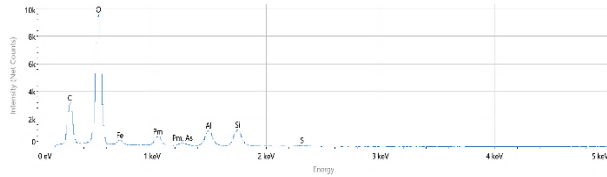


Gambar 4.2 Hasil Pemeriksaan Scanning Electron Microscope (SEM)

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Foto SEM menunjukkan partikel fly ash berbentuk sferis dengan ukuran bervariasi. Warna terang menandakan padatan mineral, sedangkan area gelap menunjukkan pori. Karakteristik ini mendukung pemanfaatan fly ash sebagai bahan geopolimer karena bentuk sferis meningkatkan workability dan pori memengaruhi densitas serta reaktivitas.

Selanjutnya, hasil pemeriksaan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS) ditampilkan dalam gambar dan tabel berikut.



Gambar 4.3 Grafik Hasil Pemeriksaan Energi Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) Kandungan Unsur pada Fly Ash

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Pada hasil pemeriksaan menunjukkan dominasi senyawa oksida dalam *fly ash* sebesar 49,9 at.% yang sesuai dengan karakteristik material pozzolanik dan potensial untuk aplikasi geopolimer.

Tabel 4.6 Hasil Pemeriksaan *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (EDS)

Element	Line	At. %	Wt. %	Net Counts	At. % Error	Wt. % Error
C	K	14,8	5,4	17 110	0,1	0,0
O	K	49,9	24,1	52 018	0,3	0,2
Al	K	8,7	7,1	8 894	0,2	0,1
Si	K	11,3	9,6	10 142	0,2	0,1
S	K	1,2	1,1	702	0,1	0,1
Fe	L	3,2	5,4	3 276	0,2	0,4
As	L	0,3	0,7	604	0,1	0,1
Pm	M	10,6	46,6	5 576	0,5	2,1

Sumber: Laboratorium Pusat Pengujian Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

4.3 Hasil Pengujian Beton Porous Geopolimer

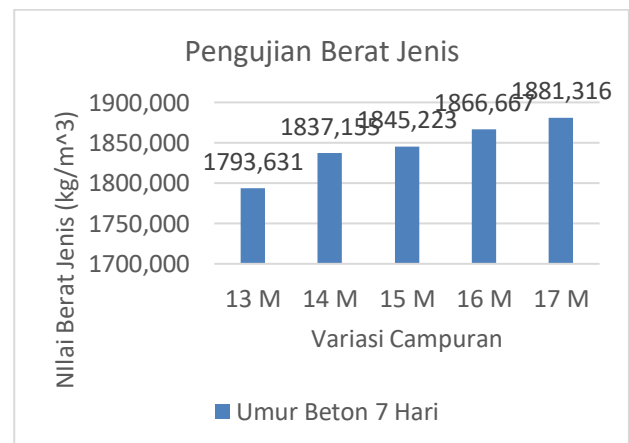
Tabel 4.7 Data – Data Penelitian di Laboratorium

Nama	Keterangan
BPG13	Beton Porous Geopolimer mol NaOH 13 M
BPG14	Beton Porous Geopolimer mol NaOH 14 M
BPG15	Beton Porous Geopolimer mol NaOH 15 M
BPG16	Beton Porous Geopolimer mol NaOH 16 M
BPG17	Beton Porous Geopolimer mol NaOH 17 M
Curing	Metode dengan cara membungkus sampel menggunakan plastik <i>wrapping</i>
Sampel Uji	Untuk setiap variasi <i>fly ash</i> , dibuat tiga buah sampel beton berbentuk silinder
Waktu Pengujian	Pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan berat jenis beton berumur 7 hari dan 28 hari

	Pengujian porositas dan permeabilitas dilakukan setelah beton mencapai umur 28 hari
Syarat Pengujian	Semua sampel diperlakukan sama melalui proses <i>curing</i> , lalu diuji sesuai standar
Standar Pengujian	Pengujian kuat tekan mengikuti standar ASTM C39, dengan nilai acuan yang merujuk pada ACI 522R-10 Pengujian kuat tarik belah berdasarkan standar ASTM C496 Uji porositas mengacu pada ASTM C1688 dengan acuan ACI 522R-10 Pengujian permeabilitas sesuai standar ACI 522R-10
Alat Pengujian	Pengujian berat jenis beton menggunakan timbangan digital sebagai alat ukur Pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah menggunakan UTM Pengujian porositas dengan bantuan timbangan digital Pengujian permeabilitas menggunakan alat <i>falling head permeameter</i>

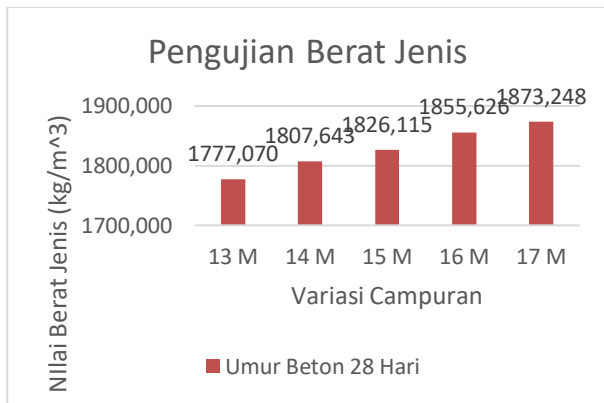
4.3.1 Pengujian Berat Jenis Beton Porous Geopolimer

Pengujian berat jenis dilakukan pada umur 7 dan 28 hari dengan menimbang benda uji silinder (10×20 cm) lalu membaginya dengan volumenya. Hasil pengujian ditampilkan pada Gambar 4.4 dan 4.5.

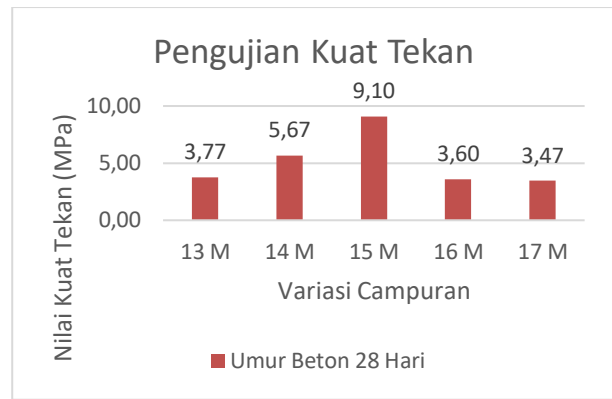


Gambar 4.4 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Berat Jenis Umur 7 Hari

Diagram batang menunjukkan variasi berat jenis tiap komposisi *fly ash*. Nilai tertinggi dicapai pada molaritas 17 M dan terendah 13 M, berdasarkan rata-rata 6 sampel. Kenaikan molaritas NaOH meningkatkan berat jenis karena lebih banyak material terlarut, padatan bertambah, dan air bebas berkurang.



Gambar 4.5 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Berat Jenis Umur 28 Hari



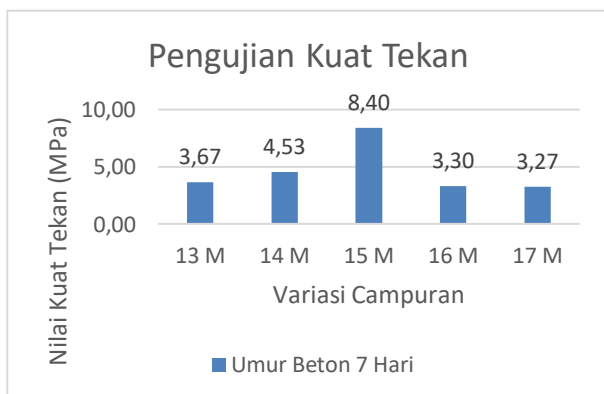
Gambar 4.7 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Kuat Tekan Umur 28 Hari

4.3.2 Pengujian Kuat Tekan Beton Porous Geopolimer

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberi beban maksimum vertikal pada benda uji silinder (N/mm²). Pada umur 7 dan 28 hari, variasi 15 M (BPG15) menghasilkan kuat tekan tertinggi, yaitu 8,40 MPa dan 9,10 MPa, sedangkan terendah pada 17 M (BPG17), yaitu 3,27 MPa dan 3,47 MPa. Nilai rata-rata tiga sampel menunjukkan kuat tekan meningkat seiring molaritas NaOH hingga 15 M. Molaritas berlebih (>15 M) menurunkan kekuatan akibat terbentuknya fasa alkali rapuh.

Tabel 4.8 Data Hasil Pengujian Kuat Tekan

Variasi Molaritas	Nilai Kuat Tekan (MPa)	
	7 hari	28 hari
Umur Beton		
BPG13	3,67	3,77
BPG14	4,53	5,67
BPG15	8,40	9,10
BPG16	3,30	3,60
BPG17	3,27	3,47



Gambar 4.6 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Kuat Tekan Umur 7 Hari

Peningkatan kuat tekan hingga molaritas 15 M menunjukkan bahwa tingginya konsentrasi ion OH⁻ mempercepat proses pelarutan SiO₂ dan Al₂O₃ dari *fly ash*, sehingga lebih banyak terbentuk gel N-A-S-H yang mengisi pori antar-agregat. Namun pada molaritas >15 M, kelebihan ion Na⁺ menyebabkan segregasi alkali serta pembentukan fasa alkali bebas yang tidak berpartisipasi dalam pembentukan jaringan polimer. Hal ini menghasilkan struktur mikro yang kurang homogen dan padat, sehingga menurunkan kuat tekan.

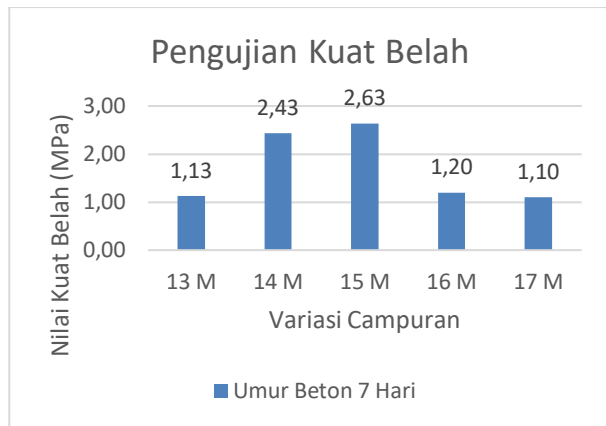
4.3.3 Pengujian Kuat Tarik Belah Beton Porous Geopolimer

Pengujian kuat tarik belah dalam penelitian ini diuji dengan beban horizontal maksimum (satuan Newton). Hasil pengujian kuat tarik belah beton dapat dilihat pada tabel 4.9.

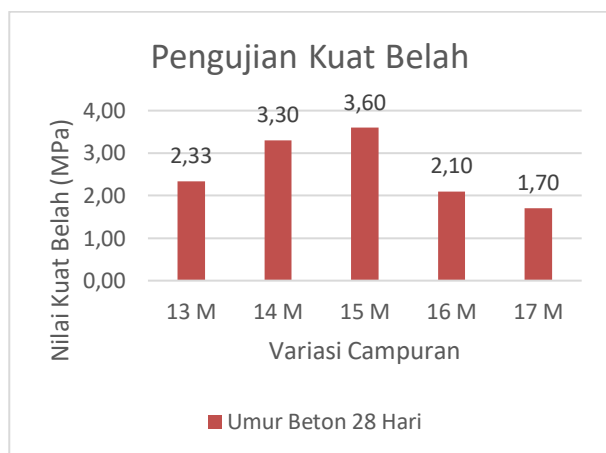
Tabel 4.9 Data Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah

Variasi Molaritas	Nilai Kuat Tarik Belah (MPa)	
	7 hari	28 hari
Umur Beton		
BPG13	1,13	2,33
BPG14	2,43	3,30
BPG15	2,63	3,60
BPG16	1,20	2,10
BPG17	1,10	1,70

Pada umur 7 dan 28 hari, variasi BPG15 (NaOH 15 M) menghasilkan kuat tarik belah tertinggi (2,63 MPa dan 3,60 MPa), sedangkan BPG17 (NaOH 17 M) terendah (1,10 MPa dan 1,70 MPa).



Gambar 4.8 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Umur 7 Hari



Gambar 4.9 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Kuat Tarik Belah Umur 28 Hari

Kuat tarik belah meningkat seiring kuat tekan, mencapai puncak pada NaOH 15 M. Nilai rata-rata berasal dari tiga sampel per variasi. Faktor yang memengaruhi kuat tekan juga berdampak serupa pada kuat tarik belah.

4.3.4 Pengujian Permeabilitas Beton Porous Geopolimer

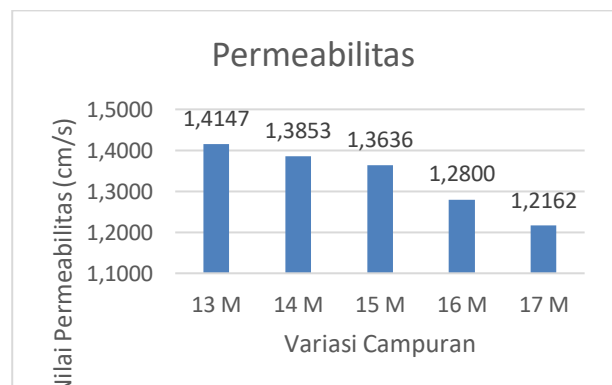
Permeabilitas diukur pada umur 28 hari menggunakan koefisien Darcy (cm/detik), dengan rata-rata dari tiga sampel per variasi. Hasilnya tercantum di Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Data Hasil Pengujian Permeabilitas

Variasi	Nilai Permeabilitas (cm/detik)
BPG13	1,4147
BPG14	1,3853
BPG15	1,3636
BPG16	1,2800
BPG17	1,2162

Permeabilitas tertinggi pada NaOH 13 M (1,4147 cm/detik), terendah pada 17 M (1,2162 cm/detik). Penurunan permeabilitas disebabkan oleh pengendapan binder yang menghalangi aliran air, terutama pada variasi 16 M.

Semakin tinggi molaritas NaOH, maka semakin padat mikrostruktur akibat reaksi geopolimerisasi, sehingga permeabilitas menurun. Hanya variasi 17 M yang memenuhi standar ACI 522R-10 (0,14–1,22 cm/detik), sementara variasi lain melebihi batas maksimal 1,22 cm/detik.



Gambar 4.10 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Permeabilitas Umur 28 Hari

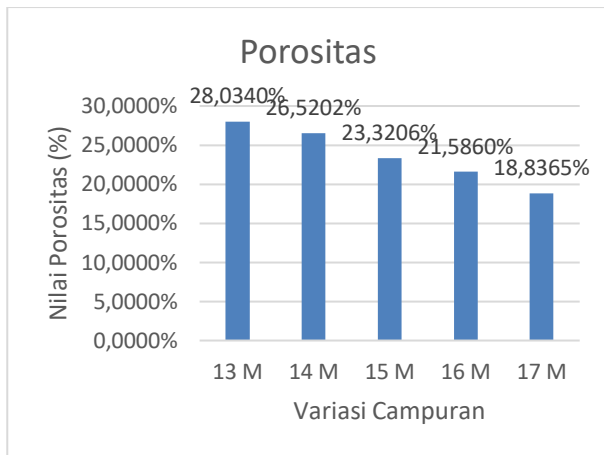
4.3.5 Pengujian Porositas Beton Porous Geopolimer

Porositas diuji pada umur 28 hari dengan 3 sampel untuk setiap variasi. Nilai porositas menurut standar ACI 522R-10 mensyaratkan dalam rentang 15%–35%. Hasil pengujian tercantum di Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Data Hasil Pengujian Porositas

Variasi	Nilai Porositas (%)
BPG13	28,0340%
BPG14	26,5202%
BPG15	23,3206%
BPG16	21,5860%
BPG17	18,8365%

Porositas tertinggi pada NaOH 13 M (28,0340%) karena reaksi geopolimerisasi terbatas. Sementara itu, nilai terendah terdapat pada variasi 17 M (18,8365%) karena pori terisi binder geopolimer. Hasil pengujian porositas dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Grafik Diagram Batang Hasil Pengujian Porositas Umur 28 Hari

Peningkatan molaritas NaOH mempercepat pelarutan *fly ash*, membentuk lebih banyak gel sodium aluminosilikat hidrat (N-A-S-H) yang mengisi pori, sehingga porositas menurun. Semua variasi tetap memenuhi standar ACI 522R-10 yang berada dalam rentang 15%-35%. Penurunan porositas seiring peningkatan molaritas menunjukkan bahwa reaksi geopolimerisasi berlangsung lebih intens pada konsentrasi NaOH tinggi sehingga lebih banyak produk N-A-S-H gel yang mengisi rongga. Namun pada molaritas 17 M, pembentukan gel yang terlalu cepat menyebabkan pengendapan tidak merata sehingga menurunkan efisiensi pengisian pori.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Sata et al. [2] yang melaporkan bahwa beton porous geopolimer memiliki kuat tekan optimum pada molaritas 15 M. Selain itu, Abdullah et al. [3] juga menunjukkan bahwa molaritas terlalu tinggi dapat menurunkan kualitas matriks geopolimer akibat segregasi alkali. Nilai permeabilitas yang diperoleh juga mendekati penelitian Arafa et al. [11], yang menunjukkan tren penurunan permeabilitas seiring meningkatnya densifikasi matriks geopolimer.

5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian terkait sifat mekanik, porositas, dan permeabilitas dari campuran variasi molaritas NaOH pada beton porous geopolimer, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Molaritas NaOH 15 M menghasilkan kuat tekan optimum pada beton porous geopolimer. Pada konsentrasi ini, ion OH^- cukup untuk melarutkan silika dan alumina dari *fly ash* secara efektif, membentuk matriks geopolimer (N-A-S-H) yang

homogen dan padat. Molaritas lebih rendah (13 M) menyebabkan reaksi geopolimerisasi tidak sempurna, sedangkan molaritas lebih tinggi (16–17 M) justru menurunkan kekuatan akibat kelebihan ion Na^+ dan OH^- yang mengganggu pembentukan struktur, sehingga 15 M merupakan titik keseimbangan terbaik antara reaktivitas dan kualitas matriks.

2. Kuat tekan dan kuat tarik belah tertinggi dicapai pada BPG15, yaitu 8,40 MPa dan 2,63 MPa (7 hari) serta 9,10 MPa dan 3,60 MPa (28 hari). Peningkatan kekuatan sejalan dengan optimalnya reaksi geopolimerisasi pada 15 M, yang menghasilkan jaringan polimer lebih padat. Kuat tarik belah menunjukkan tren yang konsisten dengan kuat tekan, mengindikasikan bahwa faktor yang memengaruhi keduanya saling berkaitan.
3. Permeabilitas tertinggi terjadi pada BPG13 (1,4147 cm/detik) dan terendah pada BPG17 (1,2162 cm/detik) pada umur 28 hari, sejalan dengan porositasnya (28,0340% dan 18,8365%). Peningkatan molaritas NaOH memperkuat reaksi geopolimerisasi, mengurangi pori, meningkatkan kepadatan, dan menghambat aliran air sehingga dapat menurunkan nilai permeabilitas.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, penelitian lanjutan disarankan menguji variasi rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ untuk menentukan rasio optimal yang menyeimbangkan kekuatan mekanik, porositas, dan permeabilitas beton porous geopolimer, serta pengujian panel lapangan untuk mengevaluasi performa drainase dan kekuatan aktual pada kondisi lingkungan nyata.

Daftar Pustaka

- [1] D. Hardjito, "Studies on Fly Ash-Based Geopolymer Concrete," Curtin University of Technology, 2005.
- [2] V. Sata, A. Wongsu, and P. Chindaprasirt, "Properties of pervious geopolymer concrete using recycled aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 42, pp. 33–39, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.046>.
- [3] M. M. A. Abdullah, H. Kamarudin, H. Mohammed, I. Khairul Nizar, A. R. Rafiza, and Y. Zarina, "The relationship of NaOH molarity, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio, fly ash/alkaline activator ratio, and curing temperature to the strength of fly ash-based geopolymer," *Adv. Mater. Res.*, vol. 328–330, no. September, pp. 1475–1482, 2011, doi:

- 10.4028/www.scientific.net/AMR.328-330.1475.
- [4] E. Widyaningsih, B. Herbudiman, and F. F. Fauzi, "Evaluasi Pengaruh Variasi Molaritas dan Rasio Alkali Aktivator terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer," *RekaRacana J. Tek. Sipil*, vol. 8, no. 3, p. 176, 2023, doi: 10.26760/rekaracana.v8i3.176.
- [5] M. B. Honny, J. W. Thiofilus, D. Hardjito, and Antoni, "Pengaruh Metode Pembuatan dan Komposisi Alkali Aktivator Terhadap Karakteristik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Tipe C," *J. Dimens. Pratama Tek. Sipil*, vol. 8, no. 2, pp. 236–242, 2019, [Online]. Available: <http://publication.petra.ac.id/index.php/teknik-sipil/article/view/9625/8691>
- [6] R. H. Kupaei, U. J. Alengaram, and M. Z. Jumaat, "The effect of different parameters on the development of compressive strength of oil palm shell geopolymer concrete," *Sci. World J.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/898536.
- [7] S. Abdulsalam Arafa, A. Z. Mohd Ali, S. N. Rahmat, and Y. L. Lee, "Optimum Mix for Pervious Geopolymer Concrete (GEOCRETE) Based on Water Permeability and Compressive Strength," *MATEC Web Conf.*, vol. 103, pp. 1–9, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201710301024.
- [8] Y. Malik, *Studi Pengaruh Temperatur Dan Waktu Curing Terhadap Sifat Fisik–Mekanik Semen Geopolimer Berbasis Slag Ferronickel*. 2016. [Online]. Available: <https://repository.its.ac.id/71279/1/2714201014-master-theses.pdf>
- [9] B. B. Adhitya, M. A. B. Wijaya, and A. Costa, "Analisis Kekuatan Tekan Dan Permeabilitas Pervious Geopolymer Concrete Dengan Variasi Rasio Alkali Aktivator Terhadap Fly Ash," *Pros. AVoER XIV Tahun 2022*, vol. 14, no. 1, pp. 1–9, 2022.
- [10] R. J. Rumajar, M. Sumajouw, and R. Pandaleke, "Kuat Tarik Lentur Beton Geopolymer Dengan Temperatur Temperatur Ruang," vol. 7, no. 1, pp. 1–6, 2019.
- [11] S. Abdulsalam Arafa, A. Z. Mohd Ali, S. N. Rahmat, and Y. L. Lee, "Optimum Mix for Pervious Geopolymer Concrete (GEOCRETE) Based on Water Permeability and Compressive Strength," *MATEC Web Conf.*, vol. 103, no. 01024, 2017, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710301024>.