

STUDI PERFORMA MEKANIK AWAL BETON GEOPOLIMER BERBASIS *FLY ASH* TIPE C DI BAWAH PAPARAN SULFAT

*Hazen Masrafat¹ and Almutahir²

¹Fakultas Teknik, Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia; ²Badan Riset dan Inovasi Daerah Sulawesi Tenggara, Indonesia

*Corresponding Author, Received: Jul. 2025, Revised: Sep. 2025, Accepted: Dec. 2025

ABSTRACT: *This study examines the early-age sulfate resistance of Class C fly ash-based geopolymer concrete (GPC) in comparison with Portland cement concrete (PCC). The research evaluates mechanical performance, mass stability, and microstructural responses after 28 days of exposure to a 5% magnesium sulfate solution. The experimental program includes material characterization, dry-mix geopolymer preparation, sulfate immersion testing, and mechanical assessments. Chemical analysis shows that the fly ash contains 65% total pozzolanic oxides and 69.68% amorphous content, confirming its high reactivity and suitability for geopolymerization. The results indicate that GPC exhibits significantly better sulfate resistance, with a minimal mass change of only +0.03%, compared with PCC, which shows a +0.72% increase due to higher sulfate penetration. Mechanically, GPC demonstrates notable improvements: compressive strength increases by 25%, and elastic modulus rises by 9–11% after exposure. In contrast, PCC experiences only a slight increase in strength, primarily attributed to temporary pore filling from gypsum and ettringite formation rather than genuine structural enhancement. Microstructural observations confirm the presence of sulfate reaction products on both materials; however, no cracking or structural damage is detected, and GPC maintains a more stable aluminosilicate network. These findings highlight GPC's superior early-age durability and its potential as a sustainable and chemically robust alternative to PCC in sulfate-rich environments. The study provides new experimental insights into the short-term sulfate behavior of Class C fly ash-based GPC and recommends future long-term durability evaluations under extended exposure durations and field-representative conditions.*

Keywords: *Geopolymer concrete; fly ash class c; sulfate attack; mechanical properties; sustainable construction materials*

1. PENDAHULUAN

Serangan sulfat merupakan salah satu ancaman utama terhadap durabilitas beton konvensional berbasis *Portland Cement Concrete* (PCC), terutama pada struktur yang terpapar lingkungan agresif seperti wilayah pesisir, air tanah, atau tanah berkadar sulfat tinggi. [1] menegaskan bahwa durabilitas merupakan faktor penentu utama kinerja jangka panjang struktur beton, dan kerusakan akibat serangan sulfat merupakan mekanisme kritis yang melemahkan integritas material semen. Ion sulfat bereaksi dengan produk hidrasi semen, khususnya kalsium hidroksida dan fase yang mengandung alumina membentuk senyawa ekspansif yang menyebabkan mikroretak, hilangnya kohesi, dan degradasi progresif. [2] menjelaskan bahwa magnesium sulfat menghasilkan kerusakan yang lebih parah dibandingkan natrium sulfat, karena mekanisme de-kalsifikasi pada gel kalsium silikat hidrat yang mempercepat deteriorasi pada tahap awal paparan. Kerentanan PCC terutama disebabkan oleh struktur pori yang relatif besar dan ketahanan kimia yang rendah, sehingga mempermudah infiltrasi ion sulfat dan memicu perubahan mineralogi yang merusak.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, beton geopolimer muncul sebagai alternatif sistem pengikat yang menjanjikan dengan ketahanan kimia lebih tinggi dan dampak lingkungan lebih rendah. Geopolimer terbentuk melalui aktivasi alkali terhadap prekursor aluminosilikat seperti *fly ash* [3]–[6], membentuk jaringan tiga dimensi aluminosilikat melalui reaksi polikondensasi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis *fly ash* memiliki permeabilitas lebih rendah, struktur pori yang lebih padat, serta kestabilan kimia yang lebih baik dibandingkan PCC. [7], [8] melaporkan bahwa kandungan silika dan alumina amorf pada *fly ash* menyediakan reaktivitas tinggi untuk pembentukan matriks geopolimer, sementara [9], [10] menunjukkan bahwa *fly ash* kelas C dengan kandungan kalsium tinggi menghasilkan fase pengikat yang lebih stabil. Karakteristik ini memungkinkan beton geopolimer memiliki performa mekanik dan ketahanan yang lebih unggul terhadap serangan sulfat. Selain itu, manfaat lingkungan terkait pengurangan penggunaan semen semakin memperkuat relevansinya dalam konstruksi berkelanjutan.

Meskipun banyak penelitian membahas durabilitas jangka panjang beton geopolimer dalam lingkungan sulfat, terdapat kesenjangan pengetahuan penting mengenai respons mekanik usia awal terhadap paparan sulfat. Studi terdahulu lebih fokus pada mekanisme degradasi jangka panjang, sehingga pemahaman tentang bagaimana matriks geopolimer bereaksi pada tahap awal ketika proses pelarutan, pembentukan gel, dan reorganisasi struktur masih berlangsung masih terbatas. Berbeda dengan PCC yang mekanisme hidrasi sementasinya telah mapan, reaksi geopolimerisasi bersifat kompleks dan dapat menunjukkan sensitivitas khusus pada usia awal. Oleh karena itu, pengujian performa usia awal sangat penting untuk menilai kelayakan penerapan geopolimer dalam konstruksi nyata yang sering menuntut kekuatan awal dan kestabilan struktural.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi sifat mekanik awal beton geopolimer berbasis *fly ash* kelas C dengan metode pencampuran kering ketika terpapar larutan sulfat, dengan fokus pada kuat tekan, modulus elastisitas, dan *Poisson's ratio*. Studi ini membandingkan respons mekanik awal beton geopolimer dengan PCC konvensional, sehingga mengisi kekosongan literatur terkait performa jangka pendek dalam lingkungan kimia agresif. Penggunaan *fly ash* kelas C lokal dan pendekatan pencampuran kering memberikan wawasan tambahan mengenai potensi implementasi lapangan dan keberlanjutan material regional. Hasil penelitian diharapkan memberikan bukti empiris yang mendukung pemanfaatan beton geopolimer sebagai alternatif ramah lingkungan yang tahan terhadap paparan sulfat, sekaligus memperkaya pemahaman ilmiah mengenai perilaku geopolimer usia awal dalam kondisi lingkungan agresif.

2. METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan melalui empat tahapan utama yang mencakup pengumpulan material, perancangan campuran, pembuatan semen geopolimer dan beton, serta proses perendaman dalam larutan sulfat sebelum dilakukan pengujian mekanik. Penelitian ini berfokus pada dua material utama: beton geopolimer berbasis *fly ash* tipe C dan beton PCC tipe V. *Fly ash* tipe C diperoleh dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton di Probolinggo, Indonesia. Semen yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Portland Composite Cement* tipe V yang diproduksi oleh PT Semen Indonesia Group, yang dikenal memiliki ketahanan kuat terhadap konsentrasi sulfat yang tinggi.

Agregat yang digunakan terdiri dari agregat halus dan kasar. Agregat halus berupa pasir alami dari Lumajang, Jawa Timur, dengan kadar lumpur <5%, Zona 3 berdasarkan analisis saringan, massa jenis 2,82 kg/m³, dan kadar air 6,2%. Agregat kasar

berupa batu pecah *nonporous* dari Pasuruan, Jawa Timur, memiliki kadar lumpur <1%, ukuran maksimum 20 mm sesuai ASTM C136, massa jenis 2,5 kg/m³, dan kadar air 0,26%. Beton geopolimer diproduksi menggunakan *fly ash* tipe C dan aktivator alkali berupa *sodium metasilicate pentahydrate* (Na₂SiO₃·5H₂O) serta *sodium hydroxide* (NaOH) *flake*. Larutan NaOH 12M digunakan dengan rasio 1:1 terhadap Na₂SiO₃·5H₂O, mengikuti rekomendasi [11] untuk memastikan alkalinitas yang memadai bagi aktivasi *fly ash* berkalsium tinggi dan pencapaian kuat tekan yang sesuai standar tahan sulfat kelas S3 (>31 MPa). Konsentrasi NaOH dalam kisaran 10–14M juga terbukti efektif menghasilkan sifat mekanik yang baik pada beton geopolimer. Massa jenis NaOH adalah 1,33 kg/m³ dan Na₂SiO₃·5H₂O sebesar 1,56 kg/m³. Selain itu, 2% sukrosa ditambahkan untuk menjaga *workability*, berdasarkan temuan [12] yang menunjukkan efektivitasnya dalam menunda *flash setting* tanpa menghambat perkembangan kekuatan beton.

Penelitian ini menggunakan metode pencampuran kering untuk mengatasi masalah waktu ikat yang sangat cepat dan rendahnya *workability* pada beton geopolimer metode pencampuran basah, sebagaimana dilaporkan dalam studi sebelumnya oleh [13], [14]. [12]. menunjukkan bahwa pencampuran basah menyebabkan beton geopolimer cepat mengeras, sehingga sulit diaplikasikan. Melalui metode pencampuran kering, waktu ikat dapat diperpanjang hingga sekitar 150 menit, mendekati beton konvensional. Rancangan campuran awal yang berasal dari metode pencampuran basah dimodifikasi agar sesuai dengan pendekatan kering. Sebelum pencampuran, *fly ash*, NaOH, dan Na₂SiO₃·5H₂O digiling menggunakan *ball mill* (Gambar 1). Penggunaan aktivator alkali padat diketahui memperlambat reaksi dibandingkan aktivator cair. Sementara itu, campuran beton konvensional disesuaikan dengan standar ACI 211.1-91 [15]. Komposisi lengkap masing-masing campuran tercantum pada

3.3 Nilai pH dan Suhu

Pengukuran pH larutan setelah paparan sampel menunjukkan tren peningkatan alkalinitas. Pada hari ke-28, larutan rendaman GPC memiliki pH antara 9,46, sedikit lebih tinggi daripada PCC yang berada pada kisaran 9,05 (Tabel 3). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan nilai pH dari keadaan awal, dimana nilai pH awal sebesar 6,5. Hasil tersebut telah sesuai dengan yang disyaratkan pada ASTM C1012-04 [18], dimana pH larutan magnesium sulfat 50 gram / 900 mL dapat diterima

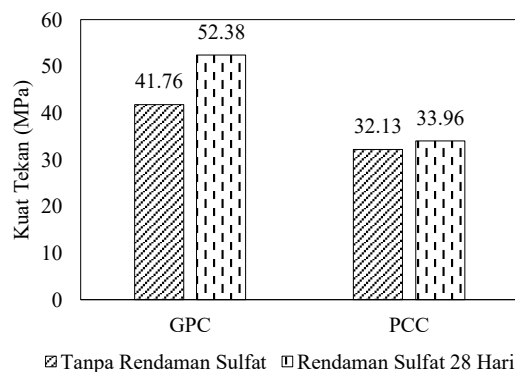
apabila berada pada kisaran 6-8. Peningkatan pH disebabkan oleh fenomena *leaching* silika dan ion-ion alkali dari material geopolimer ke dalam larutan, sebagaimana dilaporkan oleh [21] bahwa campuran geopolimer cenderung melepaskan silikat yang meningkatkan pH larutan. Stabilitas pH pada kisaran tinggi juga konsisten dengan pengamatan [22] bahwa larutan MgSO_4 cenderung mencapai kondisi stabil setelah beberapa hari interaksi dengan material berbasis semen.

Dari perspektif ketahanan material, kestabilan pH larutan selama periode pengujian menunjukkan bahwa reaksi kimia berlangsung secara gradual tanpa indikasi reaksi destruktif yang cepat. Hal ini menguatkan bahwa, pada tahap usia awal, interaksi sulfat dengan GPC maupun PCC belum berkembang menjadi mekanisme degradasi yang agresif.

Suhu larutan selama perendaman berada pada rentang stabil 25,7–26,1°C (Tabel 3), menunjukkan bahwa reaksi kimia berjalan dalam kondisi termal normal tanpa adanya fluktuasi signifikan yang dapat mempengaruhi evaluasi ketahanan material [23].

3.4 Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan pada beton PCC dan GPC telah memenuhi standar SNI 2847-2019 [24] untuk klasifikasi paparan sulfat kelas S3 yaitu minimal 31 Mpa, seperti yang ditunjukkan pada



Gambar 6, dimana beton PCC pada umur 28 hari memiliki kuat tekan sebesar 32,13 MPa dan mengalami kenaikan 5,69% setelah perendaman sulfat. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan pembentukan produk hidrasi sekunder seperti *gypsum* dan *ettringite* pada tahap awal paparan, sebagaimana dijelaskan oleh [19]. Sebaliknya, GPC menunjukkan kuat tekan awal sebesar 41,76 MPa dan meningkat hingga 25% setelah paparan. Kenaikan signifikan ini konsisten dengan studi [25] yang melaporkan bahwa kekuatan GPC dapat meningkat dalam kondisi sulfat pada periode tertentu akibat densifikasi struktur mikro.

Namun demikian, peningkatan kuat tekan GPC

yang relatif signifikan ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati. Peningkatan tersebut kemungkinan

Tabel 1 dan Tabel 2. Benda uji yang digunakan adalah silinder 100 mm × 200 mm (Gambar 2). Semua pengujian mengikuti standar ASTM C39 [16] dan C469 [17].

Setelah pengecoran, benda uji mengalami *curing* pada suhu 25±2°C dan kelembaban 60±5% selama 28 hari. Selanjutnya, benda uji direndam dalam larutan MgSO₄ dengan kadar larutan 50 gram/900mL (5%) sesuai ASTM C1012-04 [18] untuk mensimulasikan paparan sulfat. Pengujian dilakukan pada umur 28 hari untuk mewakili paparan awal. Selain ekspansi, sifat mekanik juga diukur untuk menilai degradasi akibat sulfat. Gambar 3 menunjukkan proses perendaman beton pada larutan magnesium sulfat.

Untuk setiap variasi campuran dan jenis pengujian, digunakan tiga benda uji silinder berukuran 100 mm × 200 mm. Nilai sifat mekanik yang disajikan merupakan nilai rata-rata dari tiga spesimen. Variasi data dianalisis menggunakan standar deviasi yang berada di bawah 10%, yang menunjukkan tingkat keandalan dan reproduktibilitas hasil yang baik.

Setiap nilai yang dicantumkan pada hasil pengukuran dan atau pengujian merupakan hasil rata-rata dari jumlah spesimen dan atau percobaan yang dilakukan.

2.1 Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan sesuai dengan standar ASTM C39 [16]. Benda uji beton berbentuk silinder diberi beban tekan aksial menggunakan *Universal Testing Machine* berkapasitas 200 ton. Beban diberikan dengan kecepatan 0,15–0,35 MPa/s hingga benda uji mencapai beban maksimum. Nilai kuat tekan kemudian dihitung menggunakan Persamaan (1).

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

di mana f_c' adalah kuat tekan (MPa); P adalah gaya tekan aksial (N); dan A adalah luas penampang beton (mm²).

2.2 Modulus Elastisitas dan Poisson's ratio

Modulus elastisitas dan *Poisson's ratio* ditentukan sesuai dengan standar ASTM C469 [17]. Metode pengujian ini dilakukan bersamaan dengan uji kuat tekan. Nilai regangan horizontal dipantau menggunakan instrumen CMOD yang ditempatkan pada permukaan sampel. Modulus elastisitas dihitung menggunakan Persamaan (2), dan *Poisson's ratio* dihitung menggunakan Persamaan (3). Gambar 4 menunjukkan perangkat uji untuk kuat tekan, modulus elastisitas, dan *Poisson's ratio*.

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \quad (2)$$

$$\mu = \frac{(\epsilon_{t2} - \epsilon_{t1})}{(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \quad (3)$$

dimana E adalah modulus elastisitas (MPa). S_1 adalah tegangan awal yang setara dengan 0,5 MPa; S_2 adalah tegangan pada 40% beban ultimit (MPa); ϵ_1 adalah regangan pada tegangan awal (0,5 MPa); dan ϵ_2 adalah regangan ketika tegangan mencapai 40% beban ultimit.

3. HASIL DAN DISKUSI

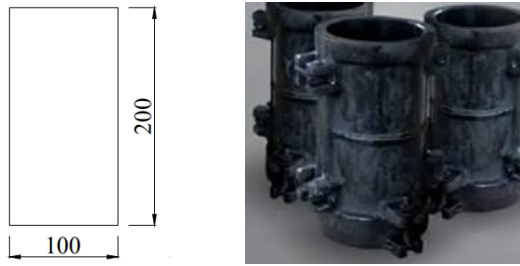
3.1 Perubahan Massa/Berat

Perubahan massa sampel setelah direndam dalam larutan MgSO₄ 5% selama 28 hari menunjukkan perbedaan signifikan antara beton GPC dan PCC. GPC mengalami perubahan massa sebesar +0,03%, sementara PCC meningkat sebesar +0,72%. Peningkatan massa pada PCC disebabkan oleh pembentukan produk reaksi seperti *ettringite* dan *gypsum* yang mengisi pori-pori, sebagaimana dijelaskan oleh [19]. Sebaliknya, perubahan massa GPC yang sangat rendah menunjukkan ketahanan terhadap penetrasi ion sulfat, sejalan dengan temuan [20] bahwa GPC memiliki porositas lebih rendah serta ketahanan lebih tinggi terhadap serangan sulfat.

Secara mekanistik, perbedaan perubahan massa ini menunjukkan bahwa reaksi sulfat pada PCC cenderung berlangsung lebih intensif akibat tingginya kandungan senyawa kalsium terhidrasi yang reaktif terhadap ion sulfat. Sementara itu, struktur GPC yang didominasi jaringan aluminosilikat menyebabkan interaksi dengan sulfat bersifat lebih terbatas dan cenderung hanya terjadi pada lapisan permukaan. Namun demikian, perlu ditekankan bahwa durasi paparan dalam penelitian ini terbatas pada 28 hari, sehingga perubahan massa yang teramati merepresentasikan respons usia awal terhadap sulfat dan belum dapat dijadikan indikator durabilitas jangka panjang.



Gambar 1. Alat Grinding untuk pembuatan Semen Geopolimer Metode Kering



Gambar 2. Cetakan silinder 100 mm × 200 mm



Gambar 3. Perendaman beton GPC dan PCC pada larutan $MgSO_4$



Gambar 4. Setup uji kuat tekan; modulus elastisitas; dan Poisson's ratio

3.2 Visual Spesimen

Hasil observasi visual pada Gambar 5 menunjukkan adanya pembentukan kristal putih pada permukaan GPC dan PCC setelah perendaman, yang dikaitkan dengan terbentuknya *gypsum* dan *ettringite*. Pada PCC, kristal ini tampak lebih tebal dan merata, mencerminkan reaksi intensif antara sulfat dengan kalsium terhidrasi dalam struktur beton, sesuai penjelasan [29]. Pada GPC, meskipun kristal putih juga terbentuk, depositnya cenderung lebih tipis dan tidak menyebar luas, menandakan mekanisme reaksi yang berbeda serta ketahanan kimia yang lebih kuat. Hal ini sejalan dengan pengamatan [30] yang

menyatakan bahwa beton geopolimer tidak menunjukkan degradasi signifikan dalam paparan sulfat bahkan dalam jangka panjang.

Namun demikian, perlu dicatat bahwa penelitian ini belum mencakup analisis mikrostruktur lanjutan seperti SEM, XRD, atau EDS. Oleh karena itu, interpretasi mekanisme reaksi sulfat didasarkan pada pengamatan visual permukaan dan perbandingan dengan literatur yang relevan. Keberadaan deposit reaksi di permukaan tidak serta-merta mencerminkan degradasi struktur internal, khususnya pada fase paparan sulfat usia awal.

3.3 Nilai pH dan Suhu

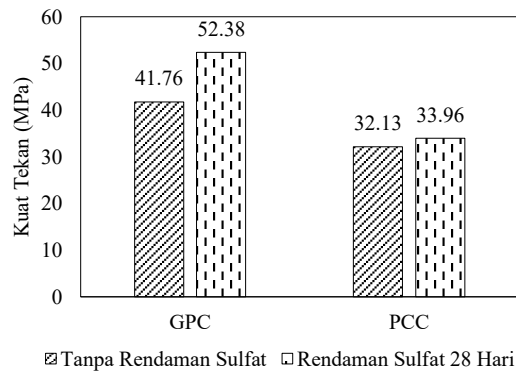
Pengukuran pH larutan setelah paparan sampel menunjukkan tren peningkatan alkalinitas. Pada hari ke-28, larutan rendaman GPC memiliki pH antara 9,46, sedikit lebih tinggi daripada PCC yang berada pada kisaran 9,05 (Tabel 3). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan nilai pH dari keadaan awal, dimana nilai pH awal sebesar 6,5. Hasil tersebut telah sesuai dengan yang disyaratkan pada ASTM C1012-04 [18], dimana pH larutan magnesium sulfat 50 gram / 900 mL dapat diterima apabila berada pada kisaran 6-8. Peningkatan pH disebabkan oleh fenomena *leaching* silika dan ion-ion alkali dari material geopolimer ke dalam larutan, sebagaimana dilaporkan oleh [21] bahwa campuran geopolimer cenderung melepaskan silikat yang meningkatkan pH larutan. Stabilitas pH pada kisaran tinggi juga konsisten dengan pengamatan [22] bahwa larutan $MgSO_4$ cenderung mencapai kondisi stabil setelah beberapa hari interaksi dengan material berbasis semen.

Dari perspektif ketahanan material, kestabilan pH larutan selama periode pengujian menunjukkan bahwa reaksi kimia berlangsung secara gradual tanpa indikasi reaksi destruktif yang cepat. Hal ini menguatkan bahwa, pada tahap usia awal, interaksi sulfat dengan GPC maupun PCC belum berkembang menjadi mekanisme degradasi yang agresif.

Suhu larutan selama perendaman berada pada rentang stabil 25,7–26,1°C (Tabel 3), menunjukkan bahwa reaksi kimia berjalan dalam kondisi termal normal tanpa adanya fluktuasi signifikan yang dapat mempengaruhi evaluasi ketahanan material [23].

3.4 Kuat Tekan

Hasil pengujian kuat tekan pada beton PCC dan GPC telah memenuhi standar SNI 2847-2019 [24] untuk klasifikasi paparan sulfat kelas S3 yaitu minimal 31 Mpa, seperti yang ditunjukkan pada



Gambar 6, dimana beton PCC pada umur 28 hari memiliki kuat tekan sebesar 32,13 MPa dan mengalami kenaikan 5,69% setelah perendaman sulfat. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan pembentukan produk hidrasi sekunder seperti *gypsum* dan *ettringite* pada tahap awal paparan, sebagaimana dijelaskan oleh [19]. Sebaliknya, GPC menunjukkan kuat tekan awal sebesar 41,76 MPa dan meningkat hingga 25% setelah paparan. Kenaikan signifikan ini konsisten dengan studi [25] yang melaporkan bahwa kekuatan GPC dapat meningkat dalam kondisi sulfat pada periode tertentu akibat densifikasi struktur mikro.

Namun demikian, peningkatan kuat tekan GPC yang relatif signifikan ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati. Peningkatan tersebut kemungkinan

Tabel 1. Komposisi beton GPC

Material	<i>Fly ash</i>	Pasir	Kerikil	NaOH	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Air	Sukrosa	FAS
Volume (kg/m ³)	591,0	509,4	1045,7	42,6	55,0	138,8	11,8	0,4

Tabel 2. Komposisi beton PCC

Material	Semen	Pasir	Kerikil	Air	FAS
Volume (kg/m ³)	520,34	577,16	1156,51	174,1	0,39

Tabel 3. Hasil pengukuran pH dan suhu

Material	Minggu ke-0	Minggu ke-1	Minggu ke-2	Minggu ke-3	Minggu ke-4
Pengukuran pH					
GPC	6,38	9,89	9,09	9,16	9,46
PCC	6,37	9,21	8,83	8,94	9,05
Pengukuran Suhu (°C)					
GPC	26,2	24,6	26	26,1	26,1
GPC	25,3	24,7	26,2	26	25,9



(a) PCC Tanpa Rendaman



(b) GPC Tanpa Rendaman



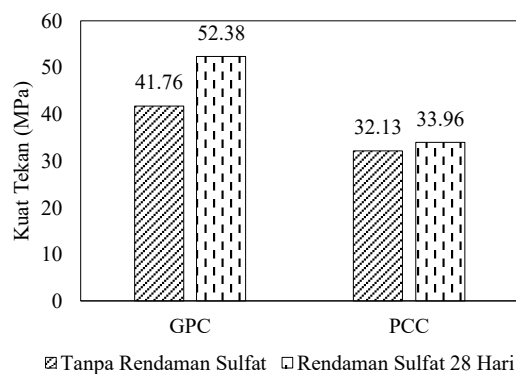
(c) PCC Rendaman 28 Hari



(d) GPC Rendaman 28 Hari

Gambar 5. Hasil pengamatan visual spesimen

berkaitan dengan densifikasi sementara mikrostruktur serta berlanjutnya proses geopolimerisasi dalam lingkungan alkali yang mengandung sulfat. Beberapa penelitian terdahulu juga melaporkan fenomena peningkatan kuat tekan jangka pendek pada sistem geopolimer usia awal sebelum mekanisme degradasi jangka panjang mulai berkembang. Oleh karena itu, peningkatan kuat tekan ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai indikator ketahanan sulfat usia awal, bukan sebagai bukti durabilitas jangka panjang.



Gambar 6. Hasil uji kuat tekan beton

3.5 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas PCC berada pada kisaran 26812–27131 MPa, sesuai dengan prediksi ACI 318-14 [26] untuk beton normal. GPC menunjukkan peningkatan modulus elastisitas sebesar 9–11% setelah perendaman, meskipun secara absolut lebih rendah 27–33% dibanding PCC. Studi Nath & Sarker (2017a) [27] juga menegaskan bahwa GPC cenderung memiliki modulus elastisitas lebih rendah akibat perbedaan mekanisme pembentukan struktur internal. Hasil uji modulus elastisitas beton ditunjukkan pada Gambar 7.

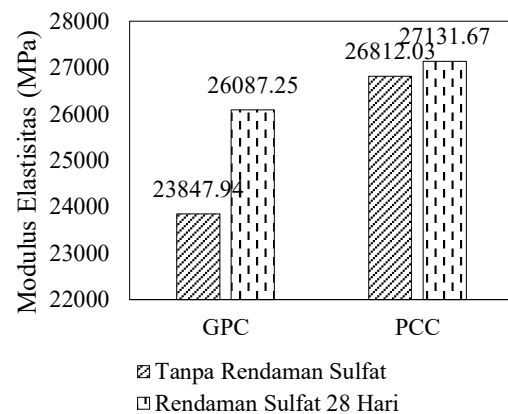
Peningkatan modulus elastisitas GPC setelah paparan sulfat usia awal mengindikasikan adanya perbaikan sementara pada kekakuan material, yang kemungkinan terkait dengan pepadatan jaringan aluminosilikat. Sebaliknya, keterbatasan perubahan modulus pada PCC menunjukkan bahwa pengaruh sulfat pada tahap awal lebih bersifat pengisian pori sementara dan belum memberikan kontribusi struktural yang berarti.

3.6 Poisson's ratio

Poisson's ratio PCC berada dalam rentang 0,20–0,22, sedangkan GPC menunjukkan nilai stabil antara 0,18–0,20. Variasi ini menunjukkan bahwa material geopolimer mempertahankan

deformasi lateral yang lebih terkendali dibanding PCC. Stabilitas nilai *Poisson's ratio* ini menunjukkan bahwa struktur GPC tetap stabil meskipun terpapar lingkungan sulfat, konsisten dengan temuan [28] yang menemukan bahwa GPC mulai menunjukkan degradasi hanya setelah paparan yang sangat panjang.

Hal ini menunjukkan bahwa, meskipun terjadi reaksi kimia di permukaan, struktur internal GPC masih mampu mempertahankan respons mekanik yang konsisten pada tahap awal paparan



Gambar 7. Hasil uji modulus elastisitas beton

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa beton geopolimer berbasis *fly ash* tipe C memiliki ketahanan sulfat usia awal yang lebih baik dibandingkan beton PCC pada paparan magnesium sulfat selama 28 hari. Perubahan massa GPC hanya sebesar +0,03%, jauh lebih rendah daripada PCC yang mencapai +0,72%. Secara mekanik, GPC mengalami peningkatan kuat tekan hingga 25% dan kenaikan modulus elastisitas 9–11% setelah perendaman, menunjukkan densifikasi mikrostruktur akibat paparan sulfat. Sebaliknya, peningkatan kuat tekan pada PCC bersifat sementara karena dipengaruhi oleh pembentukan *gypsum* dan *ettringite* yang berpotensi menyebabkan degradasi pada paparan jangka panjang.

Dari aspek mikrostruktur, keberadaan kristal putih pada kedua jenis beton mengindikasikan reaksi dengan $MgSO_4$, namun tidak ditemukannya retak pada GPC memperkuat stabilitas jaringan geopolimernya. Temuan ini menegaskan bahwa *fly ash* tipe C memiliki potensi besar sebagai material alternatif yang tahan terhadap lingkungan agresif sulfat. Untuk memperluas pemahaman, penelitian lanjutan diperlukan pada durasi paparan yang lebih panjang (≥ 90 –180 hari) dan dalam kondisi lapangan yang lebih kompleks.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan terhadap pelaksanaan penelitian ini. Terima kasih disampaikan kepada Laboratorium Material dan Struktur Gedung, ITS atas fasilitas pengujian dan dukungan teknis yang diberikan. Penghargaan juga ditujukan kepada PT Paiton Probolinggo sebagai penyedia material *fly ash* untuk keperluan penelitian. Penulis turut mengucapkan terima kasih kepada berbagai rekan akademik yang telah memberikan saran dan masukan ilmiah yang konstruktif selama proses penyusunan naskah ini.

6. REFERENCES

- [1] P. K. Mehta and R. W. Burrows, "Building Durable Structures in the 21st Century," *Concr. Int.*, vol. 23, no. 3, pp. 57–63, 2001, [Online]. Available: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/10172>
- [2] L. Jiang, D. Niu, L. Yuan, and Q. Fei, "Durability of concrete under sulfate attack exposed to freeze-thaw cycles," *Cold Reg. Sci. Technol.*, 2014, doi: 10.1016/j.coldregions.2014.12.006.
- [3] Y. Tajunnisa *et al.*, "Performance of alkali-activated fly ash incorporated with GGBFS and micro-silica in the interfacial transition zone, microstructure, flowability, mechanical properties and drying shrinkage," in *AIP Conf. Proc.*, 2023, pp. 020034-1–11. doi: 10.1063/1.5003517.
- [4] Y. Tajunnisa, W. Sutrisno, and M. Shigeishi, "Impact of PVA fiber as fine aggregate replacement in alkali-activated fly ash on flow rate, mechanical properties and drying shrinkage," vol. 17, no. 63, pp. 217–223, 2019.
- [5] Y. Tajunnisa, R. Bayuaji, N. A. Husin, Y. N. Wibowo, and M. Shigeishi, "Characterization alkali-activated mortar made from fly ash and sandblasting," *Int. J. GEOMATE*, vol. 17, no. 60, pp. 183–189, 2019, doi: 10.21660/2019.60.24636.
- [6] R. Bayuaji, N. S. Putri, L. Y. Ming, and N. A. M. Mortar, "Study Of The Utilization Of Carbide Waste And Fly Ash On Geopolymer Paste Study Of The Utilization Of Carbide Waste And Fly Ash On Geopolymer Paste," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, pp. 1–7. doi: 10.1088/1757-899X/743/1/012042.
- [7] M. Amran *et al.*, "Long-term durability properties of geopolymer concrete: An in-depth review," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. July, p. e00661, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00661.
- [8] D. Hardjito and B. V. Rangan, "Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete," *Res. Rep. GC*, p. 94, 2005, [Online]. Available: http://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/curtin-flyash-GP-concrete-report.pdf
- [9] D. W. Law, A. A. Adam, T. K. Molyneaux, I. Patnaikuni, and A. Wardhono, "Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete," *Mater. Struct. Constr.*, 2014, doi: 10.1617/s11527-014-0268-9.
- [10] Y. N. Wibowo and B. Piscesa, "Investigation on the mechanical behavior of high-calcium fly ash geopolymer concrete using one-part method," *Constr. Build. Mater.*, vol. 490, no. February, p. 142436, 2025, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.142436.
- [11] R. Bayuaji, A. K. Yasin, T. E. Susanto, and M. S. Darmawan, "A review in geopolymer binder with dry mixing method (geopolymer cement)," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1887, 2017, doi: 10.1063/1.5003505.
- [12] A. Antoni, S. W. Wijaya, J. Satria, A. Sugiarto, and D. Hardjito, "The use of borax in deterring flash setting of high calcium fly ash based geopolymer," *Mater. Sci. Forum*, vol. 857, pp. 416–420, 2016, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.857.416.
- [13] T. Phoo-Ngernkham, C. Phiangphimai, N. Damrongwiriyanupap, S. Hanjitsuwan, J. Thumrongvut, and P. Chindaprasirt, "A Mix Design Procedure for Alkali-Activated High-Calcium Fly Ash Concrete Cured at Ambient Temperature," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/2460403.
- [14] N. A. Husin, R. Bayuaji, Y. Tajunnisa, M. S. Darmawan, and P. Suprobo, "Performance of high calcium fly ash based geopolymer concrete in chloride environment," *Int. J. GEOMATE*, vol. 19, no. 74, pp. 107–113, 2020, doi: 10.21660/2020.74.56966a.
- [15] ACI 211.1-91, *ACI 211.1-91*. 2002, pp. 1–38.
- [16] ASTM C39/C39M-15a, "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens." doi: 10.1520/C0039.
- [17] ASTM C469/C469M-14, "Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in

- Compression,” United States, 2014. doi: 10.1520/C0469.
- [18] ASTM C1012 - 04, “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.”
- [19] M. Santhanam, M. D. Cohen, and J. Olek, “Sulfate attack research - whither now?,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, pp. 845–851, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00510-5.
- [20] M. B. Karakoç, I. Türkmen, M. M. Maraş, F. Kantarci, and R. Demirboğa, “Sulfate resistance of ferrochrome slag based geopolymer concrete,” *Ceram. Int.*, vol. 42, no. 1, pp. 1254–1260, 2016, doi: 10.1016/j.ceramint.2015.09.058.
- [21] Z. Baščarević, M. Komljenović, Z. Miladinović, V. Nikolić, N. Marjanović, and R. Petrović, “Impact of sodium sulfate solution on mechanical properties and structure of fly ash based geopolymers,” *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 3, pp. 683–697, 2014, doi: 10.1617/s11527-014-0325-4.
- [22] H. Rashidian-Dezfouli and P. R. Rangaraju, “A comparative study on the durability of geopolymers produced with ground glass fiber, fly ash, and glass-powder in sodium sulfate solution,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 153, pp. 996–1009, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.139.
- [23] A. Dihydrogen *et al.*, “Elevated-Temperature Performance, Combustibility and Fire Propagation Index of Fly Ash-Metakaolin Blend Geopolymers with Addition of Monoaluminium Phosphate (MAP) and Aluminum Dihydrogen Triphosphate (ATP),” *Materials (Basel)*, vol. 14, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14081973>.
- [24] Badan Standardisasi Nasional, *SN 2847:2019 tentang Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan*, no. 8. Jakarta, 2019.
- [25] H. Cheng, T. Liu, D. Zou, and A. Zhou, “Compressive strength assessment of sulfate-attacked concrete by using sulfate ions distributions,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 293, p. 123550, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123550.
- [26] ACI318-14, *Building Code Requirements for Structural Concrete*. 2014.
- [27] P. Nath and P. K. Sarker, “Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 130, pp. 22–31, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034.
- [28] V. W. G. Saavedra, D. E. Angulo, and R. Mejía de Gutiérrez, “Fly Ash Slag Geopolymer Concrete: Resistance to Sodium and Magnesium Sulfate Attack,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 12, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001618.
- [29] M. Maes and N. De Belie, “Influence of chlorides on magnesium sulphate attack for mortars with Portland cement and slag based binders,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 155, pp. 630–642, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.201.
- [30] M. A. R. Bhutta, W. M. Hussin, M. Azreen, and M. M. Tahir, “Sulphate Resistance of Geopolymer Concrete Prepared from Blended Waste Fuel Ash,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, no. 11, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001030.

Copyright © Composite Journal. All rights reserved, including the making of copies unless permission is obtained from the copyright proprietors.
