CITIZEN: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia
Vol 6, No. 4, 2026
ISSN: 2807-5994
https://journal.das-institute.com/index.php/citizen-journal

PENGARUH SUBSTITUSI ABU BATU CANDI TERHADAP KUAT TEKAN BETON GEOPOLIMER MUTU TINGGI PADA BERBAGAI UMUR BETON

Imran Ahmad Fauzian[1], Mochamad Teguh[2]
[1.2] Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain dan Inovasi,
Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia
Corresponding e-mail: 20511236@students.uii.ac.id

Copyright © 2026 The Author
This is an open access article
Creative Commons Attribution ShareAlike 4.0 International Licence
DOI: 10.53866/jimi.v6i4.1583

Received: *20 Oktober 2026*
Revised: *26 Oktober 2026*
Accepted: *09 November 2026*

Abstrak

Tujuan – Penelitian ini bertujuan mengevaluasi penggunaan abu batu candi sebagai substitusi sebagian fly ash pada beton geopolimer mutu tinggi serta menganalisis perkembangan kuat tekan pada berbagai umur pengujian.

Desain/metodologi/pendekatan – Penelitian eksperimental dilakukan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Universitas Islam Indonesia. Abu batu candi digunakan sebagai substitusi fly ash sebesar 0%, 10%, dan 20%, masing-masing diberi kode BG0, BG1, dan BG2. Sebanyak 36 benda uji silinder berukuran 150 × 300 mm, dengan tiga benda uji untuk setiap kombinasi variasi dan umur, diuji pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Aktivator alkali terdiri atas NaOH dan Na_2SiO_3 dengan rasio massa Na_2SiO_3:NaOH sebesar 2:1 sebagaimana dilaporkan dalam perhitungan campuran. Hasil kuat tekan diringkas menggunakan rerata, simpangan baku sampel, dan koefisien variasi. Estimasi modulus elastisitas dihitung ulang menggunakan persamaan $4200\sqrt{f'c}$ yang tertulis dalam tugas akhir.

Temuan – BG1 (10%) menghasilkan rerata kuat tekan teramati tertinggi pada seluruh umur pengujian, yaitu 42,23; 43,89; 45,25; dan 44,14 MPa pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Pada umur 14 hari, nilai BG1 lebih tinggi daripada BG0 (44,26 MPa) dan BG2 (44,67 MPa). Seluruh variasi meningkat hingga umur 14 hari dan mengalami penurunan numerik pada umur 28 hari. Nilai slump BG0, BG1, dan BG2 masing-masing sebesar 21, 22, dan 20 cm. Estimasi modulus elastisitas dihitung ulang sesuai persamaan yang tercantum dalam tugas akhir dan bukan merupakan pengukuran langsung tegangan–regangan.

Keterbatasan/implikasi penelitian – Penelitian dibatasi pada tiga kadar substitusi dan empat umur pengujian. Tugas akhir belum merinci massa fly ash dan abu batu candi secara terpisah untuk setiap variasi BG, serta belum menjelaskan apakah tiga benda uji pada setiap kelompok dibuat dalam batch independen. Molaritas NaOH juga tidak konsisten dalam tugas akhir (10 M pada prosedur pencampuran dan Tabel 5.19; 12 M pada batasan penelitian). Oleh karena itu, perbedaan yang dilaporkan bersifat deskriptif dan belum membuktikan signifikansi statistik atau kadar optimum secara umum.

Implikasi praktis – Hasil ini memberikan bukti awal bahwa substitusi 10% abu batu candi berpotensi menjadi variasi campuran yang menjanjikan dalam rentang yang diuji. Validasi lebih lanjut diperlukan terhadap proporsi campuran, konsentrasi aktivator, karakteristik material, durabilitas, dan konsistensi produksi sebelum diterapkan di lapangan.

Orisinalitas – Penelitian ini menyajikan data eksperimental kuat tekan beton geopolimer mutu tinggi dengan pemanfaatan abu batu candi lokal dari Gunungkidul sebagai substitusi sebagian fly ash, yang dievaluasi pada empat umur pengujian.

Kata kunci: Beton geopolimer; Abu batu candi; Substitusi fly ash; Kuat tekan; Modulus elastisitas

The Effect of Candi Stone Ash Substitution on the Compressive Strength of High-Strength Geopolymer Concrete at Various Concrete Ages

Abstract

Purpose – *This study examines the use of temple stone ash as a partial replacement for fly ash in high-strength geopolymer concrete and evaluates compressive-strength development at different testing ages.*

CITIZEN: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia
Vol 6, No. 4, 2026
ISSN: 2807-5994
https://journal.das-institute.com/index.php/citizen-journal

Design/methodology/approach *– An experimental study was conducted at the Construction Materials Laboratory, Universitas Islam Indonesia. Temple stone ash replaced part of the fly ash at 0%, 10%, and 20% (BG0, BG1, and BG2). A total of 36 cylindrical specimens (150 mm × 300 mm), comprising three specimens for each mixture-age combination, were tested at 3, 7, 14, and 28 days. The alkaline activator consisted of NaOH and Na_2SiO_3, with a reported Na_2SiO_3:NaOH mass ratio of 2:1. Compressive-strength results were summarized using the mean, sample standard deviation, and coefficient of variation. Estimated elastic modulus was recalculated using the $4200\sqrt{f'c}$ equation stated in the thesis.*
Findings – *BG1 (10%) produced the highest observed mean compressive strength at all testing ages: 42.23, 43.89, 45.25, and 44.14 MPa at 3, 7, 14, and 28 days, respectively. At 14 days, BG1 exceeded BG0 (44.26 MPa) and BG2 (44.67 MPa). All mixtures increased in mean strength up to 14 days and showed a numerical decrease at 28 days. The slump values were 21, 22, and 20 cm for BG0, BG1, and BG2, respectively. The estimated modulus values were recalculated using the equation specified in the thesis; they are not direct stress–strain measurements.*
Research limitations/implications – *The study is limited to three replacement levels and four testing ages. The thesis does not report separate fly ash and temple stone ash masses for each BG mixture, nor does it establish whether the three specimens in each group were produced in independent batches. The NaOH molarity is inconsistent within the thesis (10 M in the mixing procedure and Table 5.19; 12 M in the research limitations). Therefore, the reported differences are descriptive and do not establish statistical significance or a globally optimal replacement level.*
Practical implications – *The findings provide preliminary evidence that 10% temple stone ash replacement may be a promising mixture within the tested range. Further validation of mixture proportions, activator concentration, material characteristics, durability, and production consistency is required before field application.*
Originality/value – *This study reports experimental compressive-strength data for high-strength geopolymer concrete incorporating locally sourced temple stone ash from Gunungkidul as a partial fly ash replacement, evaluated at four early-to-standard testing ages.*
Keywords: *Geopolymer concrete; Temple stone ash; Fly ash replacement; Compressive strength; Elastic modulus*

1. Pendahuluan

Beton merupakan salah satu material konstruksi utama, tetapi produksi semen Portland berkaitan dengan konsumsi energi dan emisi karbon yang mendorong pengembangan material pengikat alternatif. Beton geopolimer berbasis material aluminosilikat yang diaktivasi dengan larutan alkali menjadi salah satu pendekatan yang banyak diteliti untuk mengurangi ketergantungan pada semen Portland (Singh, 2018; Ma et al., 2018; Hassan et al., 2022). Fly ash banyak digunakan sebagai prekursor karena menyediakan sumber silika dan alumina yang dapat terlibat dalam pembentukan matriks pengikat geopolimer. Kinerja material tersebut tidak hanya ditentukan oleh jenis prekursor, tetapi juga oleh komposisi dan konsentrasi aktivator, rasio larutan alkali terhadap prekursor, kehalusan fly ash, serta kondisi dan durasi curing. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa molaritas NaOH, rasio Na_2SiO_3/NaOH, rasio aktivator terhadap fly ash, dan temperatur curing dapat memengaruhi perkembangan kuat tekan beton geopolimer (Rai et al., 2018; Aliabdo et al., 2016; Topark-Ngarm et al., 2015). Kehalusan fly ash juga berperan dalam menentukan sifat mekanik geopolimer (Shinde et al., 2018), sementara evaluasi mikrostruktur melalui SEM, EDS, dan XRD dapat membantu menjelaskan hubungan antara karakteristik matriks dan kinerja material (Mehta & Siddique, 2017).

Karena itu, penggunaan material sisa sebagai substitusi sebagian fly ash perlu dievaluasi berdasarkan karakteristik bahan dan respons mekaniknya, bukan hanya berdasarkan asumsi bahwa seluruh limbah mineral memiliki reaktivitas yang sama. Ngii et al. (2024) menekankan pentingnya karakterisasi material mineral melalui pengujian seperti XRF, XRD, dan SEM untuk memahami komposisi serta struktur material, sedangkan Yulianto et al. (2024) memperlihatkan perlunya mengevaluasi material limbah berdasarkan kinerja fisik dan kuat tekan produk konstruksi. Studi terdahulu telah mengevaluasi pemanfaatan limbah pemotongan batu pada sistem geopolimer. Öztürk dan Çam (2023), misalnya, meneliti substitusi limbah pemotongan batu pada mortar geopolimer berbasis fly ash dan melaporkan bahwa pengaruhnya terhadap sifat mekanik bergantung pada jenis serta proporsi limbah yang digunakan. Penelitian Işıkdağ dan Çelikten (2025) juga menguji limbah pemotongan basalt sebagai substitusi fly ash pada mortar geopolimer dan menunjukkan

bahwa kadar substitusi serta kondisi curing berkaitan dengan kinerja mekanik dan ketahanan suhu tinggi. Studi lain pada beton geopolimer hibrida menunjukkan bahwa serbuk batuan seperti granite powder, basalt powder, dan dolomite powder dapat digunakan sebagai substitusi parsial fly ash, tetapi hasilnya bergantung pada jenis bahan, proporsi campuran, dan kondisi curing (Al-Mowafy et al., 2025).

Temuan-temuan tersebut memberi dasar bahwa limbah batu berpotensi dimanfaatkan dalam material geopolimer, tetapi hasil dari satu jenis limbah tidak dapat langsung digeneralisasi ke jenis limbah batu lainnya. Abu batu candi yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari Gunungkidul dan diproses menjadi serbuk. Penelitian ini menggunakannya sebagai substitusi sebagian fly ash pada kadar 0%, 10%, dan 20%. Selain komposisi campuran, umur pengujian juga penting karena kuat tekan dan modulus elastisitas beton geopolimer berbasis fly ash dapat berkembang seiring waktu (Hassan et al., 2022).

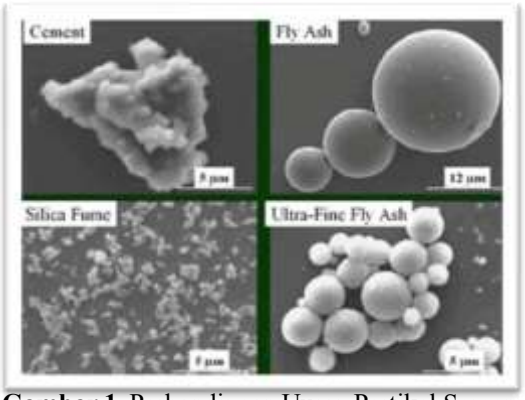
Oleh karena itu, penelitian ini mengevaluasi kuat tekan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari, serta menyajikan estimasi modulus elastisitas berdasarkan persamaan empiris yang digunakan dalam tugas akhir. Tujuan penelitian adalah menganalisis perbedaan kuat tekan teramati antarvariasi substitusi abu batu candi dan perkembangan kuat tekan terhadap umur beton. Kebaruan empiris penelitian terletak pada evaluasi abu batu candi lokal dari Gunungkidul sebagai substitusi sebagian fly ash pada beton geopolimer mutu tinggi; penelitian ini tidak mengklaim bahwa karakteristik kimia atau mekanisme reaksi abu batu candi telah dibuktikan, karena pengujian XRF, XRD, dan SEM tidak dilakukan.

2. Metode Penelitian

Penelitian menggunakan metode eksperimental yang dilaksanakan di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Desain dan Inovasi, Universitas Islam Indonesia. Variabel bebas adalah persentase substitusi abu batu candi terhadap fly ash sebesar 0%, 10%, dan 20%; variabel terikat adalah kuat tekan beton pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Benda uji berbentuk silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Setiap kombinasi variasi dan umur menggunakan tiga benda uji, sehingga terdapat 36 benda uji geopolimer. Tugas akhir juga menyebut enam benda uji beton normal, tetapi hasil kuat tekannya tidak disajikan pada tabel hasil yang digunakan dalam artikel ini; oleh karena itu, beton normal tidak dimasukkan dalam perbandingan hasil.

2.1 Material Pembentuk

Material yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas bahan penyusun beton geopolimer, yaitu *fly ash*, abu batu candi, agregat halus, agregat kasar, serta larutan aktivator alkali berupa natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na_2SiO_3). Pemilihan material tersebut disesuaikan dengan kebutuhan perencanaan campuran beton geopolimer dan tujuan penelitian, khususnya untuk mengetahui pengaruh substitusi sebagian *fly ash* dengan abu batu candi terhadap karakteristik beton pada berbagai umur. Sumber dan karakteristik masing-masing material yang digunakan dijelaskan pada uraian berikut.



Gambar 1. Perbandingan Uuran Partikel Semen, Fly Ash, dan Silica Fume



Gambar 2. NaOH (flakes)

CITIZEN: Jurnal Ilmiah Multidisiplin Indonesia
Vol 6, No. 4, 2026
ISSN: 2807-5994
https://journal.das-institute.com/index.php/citizen-journal



Gambar 3. Alkali Aktivator Na2SiO3



Gambar 4. Abu Batu Candi

Material penelitian meliputi agregat kasar dari Merapi, agregat halus dari Sungai Progo, air dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Universitas Islam Indonesia, abu batu candi dari Gunungkidul, fly ash dari Pabrik Gula Blora, Jawa Tengah, serta aktivator NaOH dan Na_2SiO_3. Tugas akhir menyebut abu batu candi dikeringkan, dihancurkan atau dihaluskan, kemudian disaring hingga lolos saringan No. 200. Target kuat tekan rencana adalah 41,4 MPa. Perencanaan campuran mengacu pada SNI 03-6468-2000 (Badan Standardisasi Nasional, 2000) sebagaimana dicantumkan dalam tugas akhir. Karakteristik kimia dan mineralogi abu batu candi maupun fly ash tidak diuji dalam penelitian ini.

Tabel 1. Proporsi campuran geopolimer yang dilaporkan untuk satu kali mixing enam silinder

Material	Proporsi per mixing	Satuan
Volume mixing	0,0318	m^3
Fly ash	14,742	kg
Total alkali aktivator	6,309	kg
Na_2SiO_3	4,208	kg
NaOH	2,104	kg
Agregat halus	23,151	kg
Agregat kasar	42,674	kg

Catatan: nilai disalin dari uraian perencanaan campuran dan Tabel 5.19 tugas akhir. Tugas akhir tidak memisahkan massa fly ash dan abu batu candi untuk setiap variasi BG0, BG1, dan BG2; karena itu, tabel ini tidak ditafsirkan sebagai komposisi lengkap masing-masing variasi.

2.2 Tahapan Pengujian Beton Geopolimer

Pembuatan benda uji dilakukan dengan menyiapkan bahan sesuai perencanaan campuran dan mencampurkannya menggunakan concrete mixer. Aktivator dibuat dengan melarutkan NaOH berbentuk flakes dalam air, kemudian mencampurkannya dengan Na_2SiO_3. Tugas akhir melaporkan rasio massa Na_2SiO_3:NaOH sebesar 2:1 pada perhitungan campuran dan molaritas NaOH 10 M pada prosedur pencampuran serta Tabel 5.19. Namun, bagian batasan penelitian menyebut 12 M; angka aktual harus dikonfirmasi dari catatan laboratorium. Campuran segar diuji slump menggunakan kerucut Abrams, kemudian dituang ke cetakan silinder yang telah diolesi oli dan dilapisi plastik mika. Setelah campuran mengeras, cetakan dilepas dan benda uji dirawat pada suhu ruang di dalam ruangan tertutup hingga umur pengujian. Tugas akhir tidak mencantumkan durasi mixing, metode pemadatan terperinci, waktu demoulding yang terukur, maupun suhu dan kelembapan aktual selama curing.

Tabel 2. Variasi benda uji beton geopolimer

Kode	Substitusi abu batu candi terhadap *fly ash*	Umur pengujian (hari)	Jumlah per umur
BG0	0%	3, 7, 14, 28	3
BG1	10%	3, 7, 14, 28	3
BG2	20%	3, 7, 14, 28	3

Modulus elastisitas pada artikel ini diperlakukan sebagai estimasi empiris berdasarkan kuat tekan, bukan hasil pengukuran langsung kurva tegangan–regangan. Untuk menjaga konsistensi dengan persamaan yang tertulis pada tugas akhir, seluruh nilai estimasi dihitung ulang menggunakan $E_c = 4200\sqrt{f'c}$. Nilai pada tabel modulus dalam draf sebelumnya tidak digunakan karena secara aritmetika mengikuti koefisien 4700, bukan koefisien 4200 yang tercantum dalam tugas akhir.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian dianalisis berdasarkan pengujian beton segar, kuat tekan beton keras, perkembangan kuat tekan terhadap umur, dan modulus elastisitas estimasi. Pembahasan difokuskan pada perbandingan BG0, BG1, dan BG2 untuk melihat pengaruh substitusi abu batu candi terhadap performa beton geopolimer mutu tinggi.

3.1 Hasil Pengujian Slump

Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui konsistensi dan kemudahan pengerjaan beton segar sebelum pencetakan. Berdasarkan Tabel 5.20 dalam tugas akhir, nilai slump BG0, BG1, dan BG2 masing-masing sebesar 21 cm, 22 cm, dan 20 cm. Nilai tersebut disajikan secara deskriptif. Tugas akhir menyebut SNI 1972:2022 pada pembahasan hasil, sedangkan bagian batasan penelitian mencantumkan SNI 1972-2008. Edisi standar yang benar-benar digunakan saat pengujian perlu diverifikasi pada catatan laboratorium sebelum pengiriman artikel.

Tabel 3. Hasil pengujian slump

Variasi	Substitusi	Slump (cm)
BG0	0%	21
BG1	10%	22
BG2	20%	20

Nilai slump tertinggi tercatat pada BG1 (22 cm), diikuti BG0 (21 cm) dan BG2 (20 cm). Data yang tersedia hanya berupa satu nilai untuk setiap variasi, sehingga interpretasi dibatasi pada perbandingan deskriptif dan tidak digunakan untuk menguji signifikansi perbedaan workability. Secara umum, workability campuran geopolimer dipengaruhi oleh karakteristik prekursor dan rasio campuran aktivator; perubahan komposisi dapat mengubah kemudahan pengerjaan (Oyejobi et al., 2023).



Gambar 5. Contoh pengujian slump beton segar

3.2 Hasil Kuat Tekan Beton Geopolimer

Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari menggunakan benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Tugas akhir menyebut permukaan benda uji diratakan melalui proses capping menggunakan belerang sebelum diuji menggunakan Compression Testing Machine. Pengujian dirujuk pada SNI 03-1974-2011 (Badan Standardisasi Nasional, 2011). Setiap kombinasi variasi dan umur terdiri atas tiga benda uji. Data individual dari Tabel 5.21–5.23 digunakan untuk menghitung kembali rerata, simpangan baku sampel (SD), dan koefisien variasi (CV).

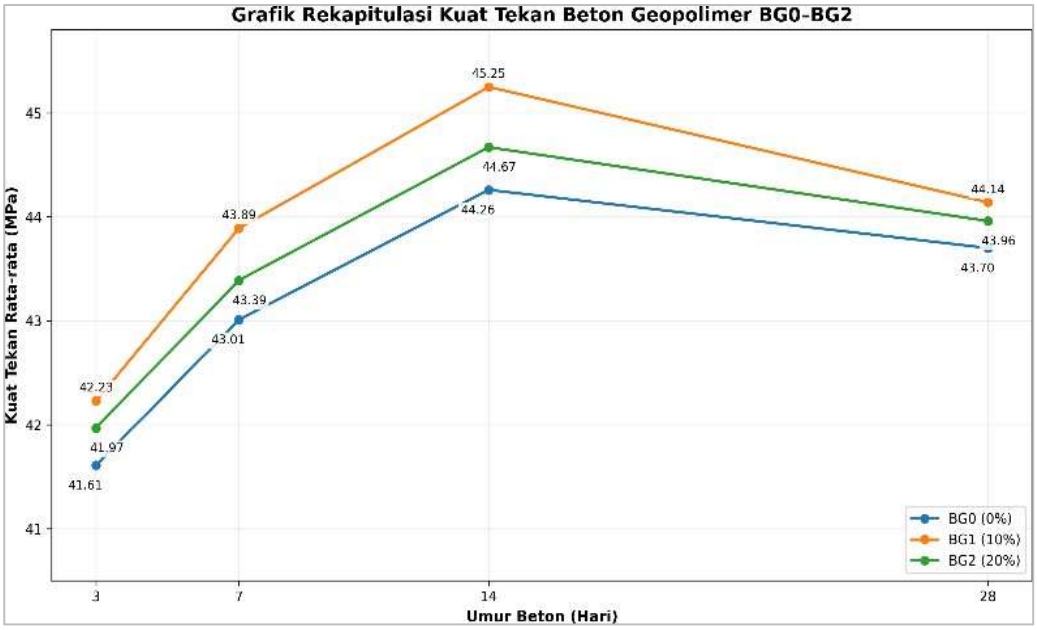
Tabel 4. Rerata kuat tekan (mean ± SD) beton geopolimer (n = 3)

Variasi	3 hari (MPa)	7 hari (MPa)	14 hari (MPa)	28 hari (MPa)
BG0 (0%)	41.61 ± 0.49	43.01 ± 1.12	44.26 ± 0.28	43.70 ± 1.53
BG1 (10%)	42.23 ± 0.08	43.89 ± 0.48	45.25 ± 0.13	44.14 ± 1.44
BG2 (20%)	41.97 ± 0.67	43.39 ± 0.29	44.67 ± 0.35	43.96 ± 0.45

Tabel 5. Data individual kuat tekan dan statistik deskriptif

Variasi	Umur (hari)	Uji 1 (MPa)	Uji 2 (MPa)	Uji 3 (MPa)	Rerata (MPa)	SD (MPa)	CV (%)
BG0	3	41.345	41.306	42.181	41.611	0.494	1.19
BG0	7	43.276	43.975	41.783	43.011	1.120	2.60
BG0	14	44.573	44.181	44.041	44.265	0.276	0.62
BG0	28	44.459	44.714	41.939	43.704	1.534	3.51
BG1	3	42.185	42.329	42.183	42.232	0.084	0.20
BG1	7	43.494	44.431	43.758	43.894	0.483	1.10
BG1	14	45.377	45.113	45.250	45.247	0.132	0.29
BG1	28	43.164	45.794	43.463	44.140	1.440	3.26
BG2	3	41.816	41.389	42.702	41.969	0.670	1.60
BG2	7	43.675	43.090	43.418	43.394	0.293	0.68
BG2	14	44.527	45.062	44.415	44.668	0.346	0.77
BG2	28	44.189	44.240	43.437	43.955	0.450	1.02

Catatan: SD = simpangan baku sampel (n−1); CV = SD/rerata × 100%. Data individual diambil dari Tabel 5.21–5.23 tugas akhir.



Gambar 6. Grafik perkembangan kuat tekan beton geopolimer BG0, BG1, dan BG2

Berdasarkan rerata yang tercantum dalam tugas akhir, pada umur 3 hari kuat tekan BG0, BG1, dan BG2 masing-masing sebesar 41,61 MPa, 42,23 MPa, dan 41,97 MPa. Pada umur 7 hari, nilainya meningkat menjadi 43,01 MPa, 43,89 MPa, dan 43,39 MPa. Pada umur 14 hari, kuat tekan mencapai 44,26 MPa, 45,25 MPa, dan 44,67 MPa. Pada umur 28 hari, nilai yang dilaporkan adalah 43,70 MPa, 44,14 MPa, dan 43,96 MPa. Seluruh variasi menunjukkan peningkatan rerata hingga umur 14 hari dan penurunan numerik pada umur 28 hari.

BG1 dengan substitusi 10% menunjukkan rerata kuat tekan teramati tertinggi pada seluruh umur pengujian. Pada umur 14 hari, rerata BG1 sebesar 45,25 MPa, dibandingkan 44,26 MPa pada BG0 dan 44,67 MPa pada BG2. Dibandingkan BG0, rerata BG1 lebih tinggi sekitar 1,49%, 2,05%, 2,24%, dan 1,01% pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Perbandingan ini bersifat deskriptif; tanpa informasi independensi batch dan uji inferensial yang sesuai, perbedaan tersebut tidak dapat dinyatakan signifikan.

Hasil BG1 menunjukkan bahwa substitusi 10% menghasilkan rerata kuat tekan teramati tertinggi dalam rentang kadar yang diuji. Penjelasan mengenai kemungkinan efek pengisian (filler effect) atau perubahan reaktivitas prekursor harus diperlakukan sebagai hipotesis, bukan mekanisme yang telah dibuktikan, karena penelitian tidak melakukan karakterisasi XRF, XRD, SEM, maupun analisis porositas terhadap abu batu candi dan matriks geopolimer. Kecenderungan bahwa limbah pemotongan batu dapat memengaruhi kinerja mekanik geopolimer juga dilaporkan pada mortar berbasis fly ash, meskipun jenis limbah, proporsi, dan kondisi curing pada studi tersebut berbeda dari penelitian ini (Öztürk & Çam, 2023; Işıkdağ & Çelikten, 2025; Al-Mowafy et al., 2025).

BG2 dengan substitusi 20% menghasilkan kuat tekan rata-rata 44,67 MPa pada umur 14 hari dan 43,96 MPa pada umur 28 hari. Nilai tersebut lebih tinggi daripada BG0 pada umur yang sama, tetapi lebih rendah daripada BG1. Dengan demikian, peningkatan substitusi dari 10% menjadi 20% tidak diikuti peningkatan rerata kuat tekan pada campuran yang diuji. Temuan ini hanya berlaku pada tiga kadar substitusi yang diteliti dan tidak menetapkan kadar optimum di luar rentang tersebut.

3.3 Perkembangan Kuat Tekan terhadap Umur Beton Geopolimer

Perkembangan kuat tekan beton geopolimer dianalisis berdasarkan perubahan nilai kuat tekan pada umur 3, 7, 14, dan 28 hari. Analisis ini dilakukan untuk melihat kecenderungan peningkatan atau perubahan kuat tekan pada setiap variasi substitusi abu batu candi. Perubahan nilai kuat tekan antarumur dihitung berdasarkan selisih nilai kuat tekan pada umur pengujian yang berurutan. Hasil perkembangan kuat tekan beton geopolimer pada masing-masing variasi disajikan pada Tabel 4.

Peningkatan rerata kuat tekan dari umur 3 hingga 14 hari menunjukkan perkembangan kekuatan pada periode pengujian tersebut. Namun, karena pengujian hanya dilakukan hingga umur 28 hari, hasil ini tidak cukup untuk menyimpulkan pola perkembangan jangka panjang atau mekanisme reaksi secara rinci. Perkembangan sifat mekanik berdasarkan umur juga telah dilaporkan pada beton geopolimer berbasis fly ash, walaupun pola aktualnya dipengaruhi oleh komposisi dan kondisi curing (Hassan et al., 2022).

Tabel 6. Perkembangan rerata kuat tekan beton geopolimer

Variasi	3 Hari (MPa)	7 Hari (MPa)	Δ 3–7 Hari	14 Hari (MPa)	Δ 7–14 Hari	28 Hari (MPa)	Δ 14–28 Hari
BG0 (0%)	41,61	43,01	+1,40	44,26	+1,25	43,70	−0,56
BG1 (10%)	42,23	43,89	+1,66	45,25	+1,36	44,14	−1,11
BG2 (20%)	41,97	43,39	+1,42	44,67	+1,28	43,96	−0,71

Dibandingkan umur 14 hari, rerata kuat tekan pada umur 28 hari menurun sebesar 0,56 MPa pada BG0, 1,11 MPa pada BG1, dan 0,71 MPa pada BG2. Perubahan ini merupakan penurunan numerik dalam data yang diamati dan tidak dapat ditafsirkan sebagai penurunan kekuatan jangka panjang. Pengujian pada umur 56, 90, atau lebih lanjut diperlukan untuk mengidentifikasi perkembangan berikutnya.

3.4 Modulus Elastisitas

Modulus elastisitas dalam penelitian ini disajikan sebagai estimasi empiris berdasarkan kuat tekan rata-rata, mengikuti persamaan yang tercantum pada tugas akhir. Nilai tersebut bukan hasil pengukuran langsung hubungan tegangan–regangan. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan ulang adalah:

$$E_c = 4200\sqrt{f'_c}$$

Keterangan:

- $E_!$ = modulus elastisitas beton (MPa)
- $f"$ = kuat tekan beton (MPa)
- 4200 = koefisien empiris sebagaimana tertulis dalam tugas akhir.

Nilai modulus elastisitas dihitung ulang menggunakan $E_c = 4200\sqrt{f'c}$ dan nilai kuat tekan rata-rata yang dibulatkan menjadi dua angka desimal. Tugas akhir mencantumkan koefisien 4200 pada persamaan, tetapi nilai pada tabel modulusnya sesuai dengan koefisien 4700. Untuk menghilangkan ketidaksesuaian tersebut, tabel artikel ini menggunakan hasil perhitungan ulang berdasarkan koefisien 4200 yang tertulis pada persamaan tugas akhir. Karena merupakan estimasi empiris, nilai tersebut tidak boleh ditafsirkan sebagai hasil pengukuran modulus secara langsung.

Tabel 7. Estimasi modulus elastisitas berdasarkan $E_c = 4200\sqrt{f'c}$

Variasi	3 hari (MPa)	7 hari (MPa)	14 hari (MPa)	28 hari (MPa)
BG0	30.317,73	30.823,54	31.268,25	31.069,81
BG1	30.542,77	31.137,28	31.616,02	31.225,83
BG2	30.448,60	30.959,41	31.412,74	31.162,10

Berdasarkan perhitungan ulang dengan koefisien 4200, estimasi modulus tertinggi diperoleh pada BG1 umur 14 hari, yaitu sekitar 28.252,61 MPa. Urutan nilai estimasi mengikuti nilai kuat tekan karena modulus dihitung langsung dari kuat tekan. Dengan demikian, hasil modulus ini bukan bukti independen tambahan mengenai kekakuan material.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan, BG1 dengan substitusi 10% abu batu candi menunjukkan rerata kuat tekan teramati tertinggi di antara variasi yang diuji, yaitu 45,25 MPa pada umur 14 hari. Rerata kuat tekan BG0, BG1, dan BG2 pada umur 14 hari masing-masing sebesar 44,26; 45,25; dan 44,67 MPa. Seluruh variasi menunjukkan peningkatan rerata kuat tekan hingga umur 14 hari, kemudian penurunan numerik pada umur 28 hari sebesar 0,56 MPa (BG0), 1,11 MPa (BG1), dan 0,71 MPa (BG2). Nilai slump yang dilaporkan masing-masing sebesar 21, 22, dan 20 cm. Estimasi modulus elastisitas yang dihitung ulang menggunakan persamaan $E_c = 4200\sqrt{f'c}$ menghasilkan nilai tertinggi sekitar 28.252,61 MPa pada BG1 umur 14 hari. Hasil ini merupakan estimasi berbasis kuat tekan, bukan pengukuran langsung modulus elastisitas. Kesimpulan dibatasi pada rentang substitusi 0–20% dan umur pengujian 3–28 hari; penelitian ini belum membuktikan kadar optimum secara statistik.

Pernyataan Pengungkapan AI

-.

Pernyataan Ketersediaan Data

Data dan materi suplemen yang mendukung hasil penelitian ini tersedia dari penulis korespondensi apabila diminta untuk kepentingan akademik yang dapat dipertanggungjawabkan**.**

Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan terkait dengan penelitian ini.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, serta pihak-pihak yang telah membantu pelaksanaan penelitian dan penyusunan tugas akhir.

Pendanaan

Penelitian ini didanai sendiri oleh para penulis. Tidak ada dukungan atau bantuan eksternal yang diterima

Bibliografi

Al-Mowafy, A., El-Zoughiby, M. E., & Youssf, O. (2025). Integrating quarry dust and industrial waste in producing eco-friendly hybrid geopolymer concrete. Scientific Reports, 15, Article 45804. https://doi.org/10.1038/s41598-025-28913-7

Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Salem, H. A. (2016). Effect of cement addition, solution resting

time and curing characteristics on fly ash based geopolymer concrete performance. Construction and Building Materials, 123, 581–593. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.043

Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-6468-2000: Tata cara perencanaan campuran beton berkekuatan tinggi dengan semen portland dan abu terbang.

Badan Standardisasi Nasional. (2011). SNI 03-1974-2011: Cara uji kuat tekan beton dengan benda uji silinder.

Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2022). Age-dependent compressive strength and elastic modulus of fly ash-based geopolymer concrete. Structural Concrete, 23(1), 473–487. https://doi.org/10.1002/suco.202000372

Işıkdağ, B., & Çelikten, S. (2025). The effect of basalt stone cutting waste on the high-temperature performance of fly ash-based geopolymers. Journal of Building Engineering, 113, Article 114040. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114040

Ma, C. K., Awang, A. Z., & Omar, W. (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. Construction and Building Materials, 186, 90–102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111

Mehta, A., & Siddique, R. (2017). Strength, permeability and micro-structural characteristics of low-calcium fly ash based geopolymers. Construction and Building Materials, 141, 325–334. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.031

Ngii, E., Hamimu, L., Kadir, A., Alimin, A., Hasan Jamilu, L. O., Kumala, A., & Slamet. (2024). Characterization of substandard limestone aggregates using XRF, XRD, and SEM: Implications for cement paste reinforcement in concrete applications. Media Konstruksi, 9(4), 311–316. https://doi.org/10.33772/medkons.v9i4.79

Oyejobi, D., Jameel, M., Adewuyi, A., Aina, S., Avudaiappan, S., & Maureira-Carsalade, N. (2023). Analyzing influence of mix design constituents on compressive strength, setting times, and workability of geopolymer mortar and paste. Advances in Civil Engineering, 2023, Article 5522056. https://doi.org/10.1155/2023/5522056

Öztürk, Z. B., & Çam, T. (2023). Performance of eco-friendly fly ash-based geopolymer mortars with stone-cutting waste. Materials Chemistry and Physics, 307, Article 128112. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.128112

Rai, B., Roy, L. B., & Rajjak, M. (2018). A statistical investigation of different parameters influencing compressive strength of fly ash induced geopolymer concrete. Structural Concrete, 19(5), 1268–1279. https://doi.org/10.1002/suco.201700193

Shinde, P., Patankar, S., & Sayyad, A. (2018). Investigation on effects of fineness of flyash and alkaline ratio on mechanical properties of geopolymer concrete. Research on Engineering Structures and Materials, 4(1), 61–71. https://doi.org/10.17515/resm2017.01ma0119

Singh, N. B. (2018). Fly ash-based geopolymer binder: A future construction material. Minerals, 8(7), Article 299. https://doi.org/10.3390/min8070299

Topark-Ngarm, P., Chindaprasirt, P., & Sata, V. (2015). Setting time, strength, and bond of high-calcium fly ash geopolymer concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 27(7), Article 04014198. https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001157

Yulianto, T., Nugroho, M. W., Sundari, T., Khiyana, A., & Nuryana, I. K. D. (2024). Rancang bangun batako ramah lingkungan dengan bahan tambah ampas tebu: Analisis ketahanan terhadap uji kuat tekan. Media Konstruksi, 9(4), 317–326. https://doi.org/10.33772/medkons.v9i4.70