

Sifat mekanik beton geopolimer dengan substitusi parsial *calcium carbide residue* (CCR)

Muhammad Daffa Fahrezi^a, Erma Desimaliana^{b*}, Altie Santika Arifin^c

^a Mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

^b Dosen Program Studi Sarjana Teknik Sipil Institut Teknologi Nasional Bandung, Indonesia

^c PT Dian Widya Enjiniring, Bandung, Indonesia

Corresponding Author:

Email:

ermadesmaliana@itenas.ac.id

Keywords:

calcium carbide residue, compressive strength, fly ash, geopolimer concrete, splitting tensile strength

Received : 16-07-2026

Revised : 11-09-2026

Accepted : 29-09-2026

Publish : 30-09-2026

Abstract: The utilization of calcium carbide residue as a calcium-rich secondary binder offers a route to improve industrial-waste valorization in fly-ash geopolimer concrete. This study evaluates the fresh and mechanical performance of geopolimer concrete containing a 50:50 mass proportion of low-calcium fly ash and calcium carbide residue in the precursor fraction. The aggregate-to-binder ratio was 60:40, the precursor-to-alkaline-activator ratio was 70:30, and sodium hydroxide and sodium silicate were used at a 1:1 ratio. Cylindrical specimens (100 mm × 200 mm) were tested in compression at 7, 14, and 28 days, while splitting tensile strength was measured at 28 days. The mixture produced a slump-flow diameter of 555 mm, indicating high flowability despite its visually cohesive and sticky consistency. Average compressive strengths reached 13.81, 17.53, and 23.67 MPa at 7, 14, and 28 days, respectively, corresponding to a 71.4% increase from 7 to 28 days. The 28-day splitting tensile strength was 2.54 MPa, equivalent to 10.7% of the compressive strength. Compressive failure was dominated by longitudinal splitting with localized end spalling, whereas the splitting test produced a nearly straight diametral crack without massive aggregate loss. The findings demonstrate that a high-volume carbide-residue/fly-ash binder can develop structural-grade compressive strength under the adopted activation system.

Copyright © 2026 POTENSI-UNDIP

1. PENDAHULUAN

Dekarbonisasi material konstruksi mendorong pengembangan *binder* alternatif yang bertujuan mengurangi ketergantungan pada semen Portland sekaligus memanfaatkan residu hasil industri. Beton geopolimer merupakan salah satu pendekatan yang relevan dalam pengembangan *binder* alternatif karena matriks pengikatnya dibentuk melalui aktivasi alkali terhadap material kaya silika dan alumina, seperti *fly ash*. Dalam beton geopolimer, sifat mekanik tidak hanya dipengaruhi oleh kandungan prekursor, tetapi juga oleh komposisi aktivator, rasio cairan-padat, karakteristik agregat, metode perawatan, serta keberadaan unsur kalsium yang memengaruhi pembentukan gel pengikat (Amran dkk., 2020; Farooq dkk., 2021; Mohammed dkk., 2021; Provis, 2018).

Fly ash kelas F umumnya memiliki kandungan kalsium yang rendah sehingga reaksi geopolimerisasinya cenderung lambat pada suhu ruang. Penambahan sumber kalsium dapat mempercepat pembentukan produk reaksi yang menyerupai gel C-(A)-S-H dan berinteraksi dengan gel N-A-S-H, sehingga struktur pasta menjadi lebih rapat dan kekuatan awal meningkat. Salah satu sumber kalsium sekunder yang potensial adalah *calcium carbide residue* (CCR), yaitu residu produksi asetilena yang didominasi oleh $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Pemanfaatan CCR sebagai material *binder* ataupun aktivator padat mampu meningkatkan reaktivitas beton geopolimer berbasis *fly ash*, meskipun efektivitasnya sangat dipengaruhi oleh kadar substitusi, kadar air residu, alkalinitas, dan kondisi *curing* (Bawab dkk., 2025; Hanjitsuwan dkk., 2018; Julphunthong dkk., 2024; Wang dkk., 2022).

Penelitian-penelitian sebelumnya menyatakan bahwa kinerja beton dan mortar geopolimer sangat dipengaruhi oleh jenis material substitusi dan metode perawatan. Variasi tepung kaca dapat berperan sebagai sumber silika tambahan, sedangkan limbah marmer, limbah bata ringan, abu sekam padi, abu ampas tebu, abu tempurung kelapa, serbuk cangkang kerang, dan metode *curing* pembasahan menghasilkan respons kuat tekan yang berbeda akibat perbedaan komposisi kimia dan mekanisme

reaksi geopolimerisasinya (Angelika dkk., 2023; Desimaliana, Dharu, & Shima, 2025; Desimaliana dkk., 2024, 2024, 2026; Desimaliana, Widyaningsih, & Kaltsum, 2025; Desimaliana, Widyaningsih, Kaltsum, dkk., 2025; Diredja dkk., 2026; Hidayattulloh & Desimaliana, 2025; Kaltsum & Desimaliana, 2025; Mualim dkk., 2025; Pratama & Desimaliana, 2024; Rizka & Arifin, 2025; Sandika dkk., 2025). Dari penelitian-penelitian tersebut diperlukan evaluasi berbasis data eksperimen untuk setiap kombinasi limbah lokal dan sistem aktivatornya.

Penelitian terdahulu mengenai CCR umumnya menggunakan kadar 5–30% sebagai substitusi prekursor atau aktivator padat, yang terbukti mampu meningkatkan kuat tekan awal. Namun, upaya untuk memaksimalkan pemanfaatan limbah CCR belum banyak dilakukan. Informasi mengenai campuran dengan proporsi CCR ekstrem di atas 30%, khususnya substitusi hingga 50% pada beton geopolimer berbasis fly ash kelas F, masih sangat terbatas. Penetapan angka 50% dalam penelitian ini bertujuan untuk menguji batas atas toleransi kalsium dalam sistem geopolimer, serta mengamati perilaku mekanik pada titik keseimbangan sistem precursor tersebut. Selain itu, penelitian terdahulu hanya berfokus pada kuat tekan saja, sedangkan hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik belah pada komposisi CCR yang tinggi belum diteliti.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan sifat mekanik beton geopolimer dengan substitusi parsial CCR sebesar 50% *fly ash* sebagai material prekursor. Kontribusi ilmiah penelitian ini terletak pada penyajian data perkembangan kuat tekan dari umur 7 hari hingga 28 hari, kuat tarik belah pada umur 28 hari, *workability*, serta konsistensi antarspesimen untuk campuran berkadar CCR tinggi. Karena hanya satu kadar substitusi yang diteliti, penelitian ini berfokus pada respons campuran beton geopolimer terhadap keberadaan CCR pada komposisi 50%.

2. DATA DAN METODE

Material

Material penyusun terdiri atas *fly ash* kelas F dari PLTU Paiton, CCR dari bengkel las di Kota Bandung yang dikeringkan dan dihaluskan hingga lolos saringan No. 200, pasir Garut, agregat kasar, natrium hidroksida (NaOH), natrium silikat (Na_2SiO_3), serta air. Dokumentasi material utama disajikan pada Gambar 1. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa berat jenis *fly ash* ($2,58 \text{ g/cm}^3$) lebih tinggi daripada limbah karbit ($2,35 \text{ g/cm}^3$), sehingga substitusi berbasis massa akan menghasilkan kontribusi volume limbah karbit yang sedikit lebih besar. Agregat halus memenuhi persyaratan kadar lumpur, sedangkan kadar lumpur awal agregat kasar mencapai 6,28%, melampaui batas 5%; oleh karena itu, agregat kasar dicuci sebelum digunakan agar debu permukaan tidak melemahkan zona transisi antarmuka.



Gambar 1. Material penyusun: (a) CCR; (b) *fly ash* kelas F; (c) agregat kasar; (d) agregat halus; dan (e) NaOH

Tabel 1. Ringkasan karakteristik fisik material penyusun

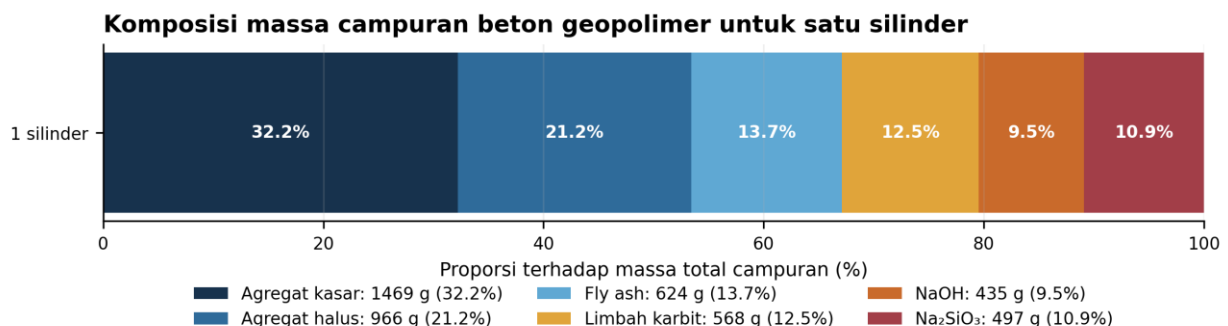
Material	Parameter Utama	Nilai	Evaluasi Teknis
Agregat Halus	Berat jenis kering, penyerapan, FM	2,36; 2,33%; 3,77	Berat jenis dan kadar lumpur 2,04% memenuhi; FM mendekati batas atas
Agregat Kasar	Berat jenis kering, penyerapan, FM	2,36; 2,33%; 3,77	Penyerapan relatif tinggi; kadar lumpur awal 6,28% sehingga dilakukan pencucian
<i>Fly Ash</i> kelas F	Berat jenis	2,58 g/cm ³	Sumber utama silika-alumina pada prekursor
<i>Calcium Carbide Residue</i> (CCR)	Berat jenis	2,35 g/cm ³	Sumber kalsium sekunder dan fraksi alkali-kalsium

Perancangan campuran dan pembuatan benda uji

Campuran dirancang berdasarkan pendekatan volumetrik yang mengacu pada prinsip perancangan campuran beton geopolimer berbasis abu terbang (Pavithra dkk., 2016). *Filler* dan *binder* ditetapkan pada rasio 60:40. Material *binder* terdiri dari prekursor dan aktivator alkali, dengan rasio 70:30. Material prekursor terdiri atas 50% *fly ash* dan 50% CCR, sedangkan aktivator alkali terdiri atas larutan NaOH dengan molalitas 10 M dan Na₂SiO₃. Uji pasta pendahuluan membandingkan rasio NaOH:Na₂SiO₃ sebesar 1:1, 1:2, dan 1:3. Rasio 1:1 dipilih karena memberikan waktu kerja lebih panjang (>20 menit), sedangkan campuran beton geopolimer dengan rasio 1:2 mulai mengeras sekitar 15 menit. Pemilihan ini penting karena campuran kaya kalsium dapat mengalami pengikatan lebih cepat dan berisiko menggumpal apabila jeda pencampuran terlalu lama. Komposisi massa disajikan pada Tabel 2 dan Gambar 2.

Tabel 2. Proporsi massa bahan untuk satu benda uji silinder

Parameter	Agregat Kasar	Agregat Halus	<i>Fly Ash</i>	<i>Calcium Carbide Residue</i>	NaOH	Na ₂ SiO ₃
Massa (g)	1.469	966	624	568	435	497
Fraksi massa (%)	32,2	21,2	13,7	12,5	9,5	10,9

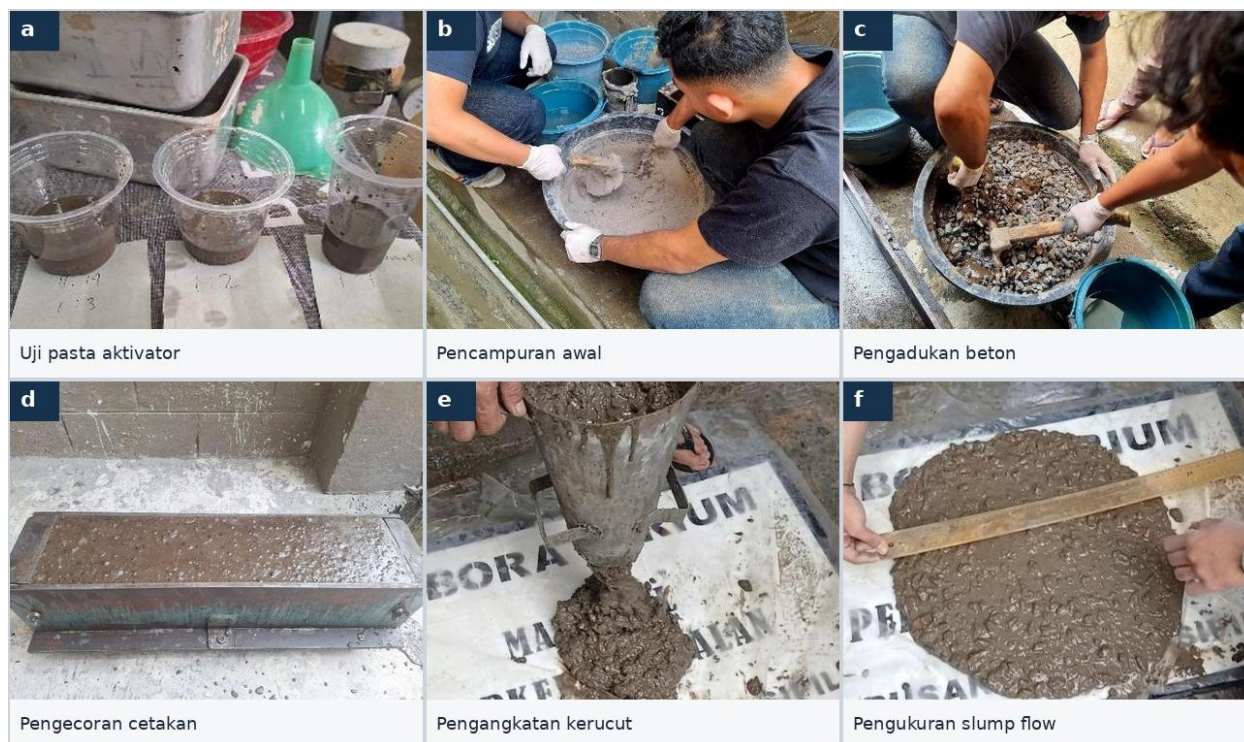
**Gambar 2.** Distribusi massa campuran untuk satu silinder beton geopolimer

Benda uji kuat tekan dan kuat tarik belah berbentuk silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Untuk setiap umur, 3 (tiga) spesimen kuat tekan diuji pada umur 7, 14, dan 28 hari, sedangkan 3 (tiga) spesimen kuat tarik belah diuji pada umur 28 hari. Urutan pekerjaan meliputi uji pasta aktivator, pencampuran bahan kering, penambahan aktivator, pengadukan hingga homogen, pengujian *slump flow*, pengecoran, pemadatan, pelepasan cetakan setelah 24 jam, dan perawatan dalam plastik kedap udara. Rangkaian kegiatan pada Gambar 3 memperlihatkan bahwa adukan memiliki kemampuan menyebar yang tinggi, tetapi tetap tampak kohesif dan lengket selama proses *curing*.

Metode pengujian dan analisis

Kelecanan beton geopolimer segar dinilai menggunakan *slump flow* dengan mengukur 2 (dua) diameter sebaran tegak lurus, kemudian diambil nilai rata-rata diameter sebaran tegak lurus. Pengukuran *slump flow* diadaptasi dari 9024:2021. Kuat tekan dihitung sebagai beban maksimum dibagi dengan luas penampang silinder. Kuat tarik belah dihitung sebagai dua kali beban maksimum dibagi dengan pi dikalikan panjang silinder dikalikan diameter silinder. Pengujian kuat tekan silinder mengacu pada SNI 1974:2023, sedangkan pengujian kuat tarik belah mengacu pada SNI 2491:2014.

Analisis dilakukan secara deskriptif melalui nilai rata-rata, simpangan baku, koefisien variasi, pertumbuhan kekuatan, serta rasio kuat tarik belah terhadap kuat tekan. Analisis inferensial antarvariasi tidak dilakukan karena penelitian tidak memiliki kelompok kontrol dan hanya menguji satu kadar substitusi CCR. Adapun tahapan pelaksanaan ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Tahapan pelaksanaan: (a) uji pasta aktivator; (b-c) pencampuran; (d) pengecoran; (e) pengangkatan kerucut; dan (f) pengukuran *slump flow*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Workability beton segar

Hasil *slump flow* menunjukkan diameter sebaran D1 sebesar 520 mm dan D2 sebesar 590 mm, sehingga diameter rata-rata mencapai 555 mm (Tabel 3). Selisih dua arah sebaran sebesar 70 mm atau 12,6% dari diameter rata-rata menunjukkan bahwa aliran belum sepenuhnya simetris. Secara visual, adukan mampu menyebar luas, tetapi selama pengadukan dan pengecoran tetap terasa kental dan lengket. Kondisi ini menunjukkan bahwa diameter sebaran yang tinggi tidak selalu identik dengan viskositas plastis yang rendah, terutama pada beton geopolimer dengan partikel halus dan reaksi pengikatan yang cepat seperti yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil pengujian dan indikator *slump flow*

D1 (mm)	D2 (mm)	Rata-rata (mm)	Selisih D1-D2 (mm)	Indeks Ketidaksimetrisan (%)	Interpretasi
520	590	555	70	12,6	Sebaran tinggi, kohesif, dan agak tidak simetris

Perbedaan antara diameter sebaran dan persepsi pengerjaan dipengaruhi oleh 2 (dua) mekanisme. Pertama, bentuk partikel halus dan luas permukaan spesifik *fly ash*—CCR meningkatkan kebutuhan pembasahan sehingga membentuk struktur pasta yang lebih kohesif. Kedua, kalsium dari CCR dapat mempercepat pembentukan produk reaksi awal sehingga viskositas meningkat seiring waktu. Implikasinya, proses pengangkutan, pengisian cetakan, dan pemadatan harus dilakukan segera setelah pencampuran beton geopolimer agar kemampuan alir yang terukur pada awal pengujian tidak hilang akibat kenaikan viskositas dan pengikatan dini.

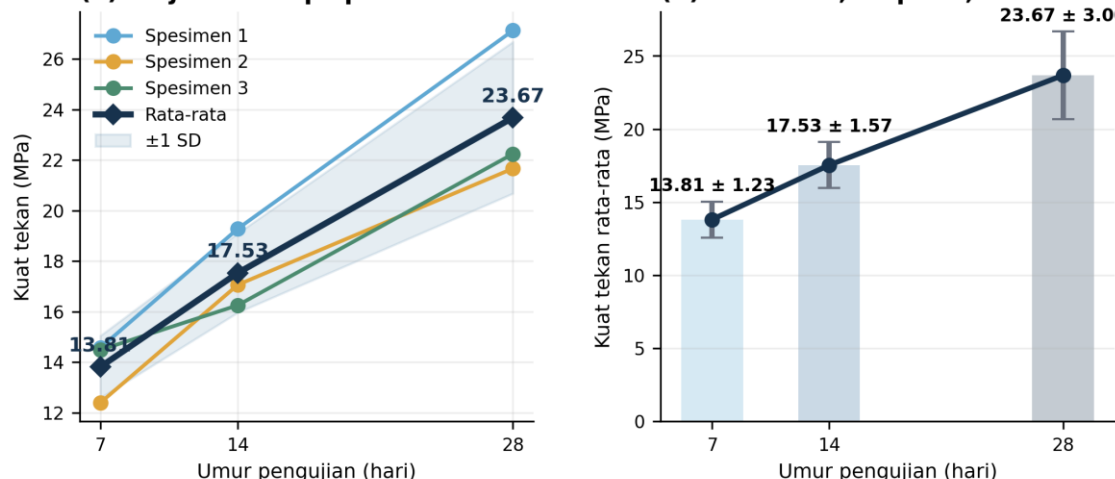
Perkembangan kuat tekan

Kuat tekan rata-rata meningkat dari 13,81 MPa pada umur 7 hari menjadi 17,53 MPa pada umur 14 hari dan 23,67 MPa pada umur 28 hari (Tabel 4 dan Gambar 4). Kenaikan 7–14 hari mencapai 26,9%, sedangkan peningkatan 14–28 hari mencapai 35,0%. Secara kumulatif kenaikannya 71,4%. Pola ini menunjukkan bahwa pembentukan struktur pengikat masih berlangsung setelah dua minggu. Tren tersebut sejalan dengan Wang dkk. (2022), yang melaporkan peningkatan kuat tekan *geopolymer fly ash*-CCR seiring bertambahnya umur akibat berlanjutnya reaksi geopolymerisasi. Hanjitsuwan dkk. (2018) juga melaporkan bahwa penambahan CCR pada sistem *alkali-activated fly ash* dapat mempercepat pengikatan dan meningkatkan perkembangan kekuatan pada kondisi curing suhu ruang seperti yang disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil pengujian kuat tekan beton geopolimer

Umur (hari)	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Rata-rata (MPa)	CV (%)
7	14,56	12,39	14,48	13,81	8,91
14	19,28	17,06	16,25	17,53	8,95
28	27,12	21,66	22,24	23,67	12,67

Perkembangan kuat tekan beton geopolimer 50% fly ash - 50% limbah karbit



Gambar 4. Perkembangan kuat tekan tiap spesimen, nilai rata-rata, dan simpangan baku

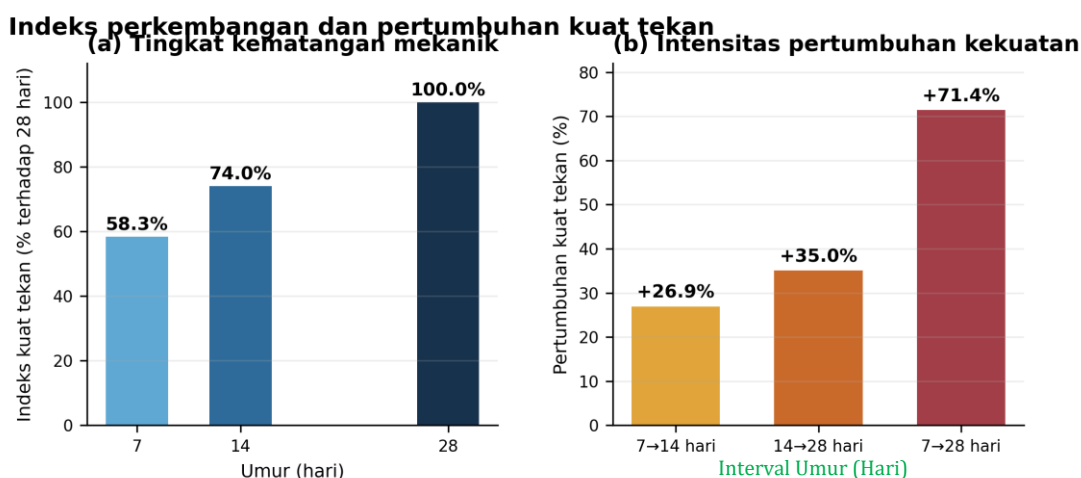
Secara mekanistik, peningkatan kekuatan dapat dijelaskan berdasarkan temuan penelitian terdahulu. Fly ash menyediakan sumber silika dan alumina reaktif, sedangkan CCR menyediakan kalsium dan alkalinitas yang dapat mendukung terbentuknya produk pengikat kaya kalsium bersama gel geopolimer. Hanjitsuwan dkk. (2018) mengaitkan peningkatan kekuatan pada sistem *fly ash*-CCR dengan tambahan pembentukan C-S-H dan N-A-S-H, sedangkan Wang dkk. (2022) mengidentifikasi C-(A)-S-H dan struktur yang lebih kompak pada rasio *fly ash*:CCR yang sesuai. Namun, penelitian ini tidak melakukan karakterisasi mikrostruktur seperti SEM, EDS, atau XRD. Oleh karena itu, pembahasan mengenai gel dan densifikasi matriks pada penelitian ini merupakan interpretasi berbasis literatur dan tidak boleh dipandang sebagai bukti langsung mengenai fase reaksi yang terbentuk pada spesimen yang diuji.

Koefisien variasi berada pada rentang 8,91–12,67%. Dispersi terbesar terjadi pada umur 28 hari: spesimen tertinggi mencapai 27,12 MPa atau 14,6% di atas rata-rata, sedangkan spesimen terendah sebesar 21,66 MPa atau 8,5% di bawah rata-rata. Rentang 5,46 MPa tersebut mengindikasikan bahwa homogenitas pencampuran, kecepatan pengecoran, pemadatan, dan distribusi partikel CCR masih berpengaruh terhadap konsistensi hasil. Walaupun demikian, kuat tekan rata-rata semua umur memperlihatkan tren kenaikan yang jelas, sehingga peningkatan kekuatan tidak bergantung pada satu spesimen saja.

Kuat tekan 28 hari sebesar 23,67 MPa berada dalam rentang yang relevan untuk beton struktural. Nilai ini juga sebanding dengan beton geopolimer berbasis *fly ash* yang dikembangkan melalui perawatan pembasahan dan modifikasi limbah mineral dalam penelitian terdahulu, meskipun perbandingan langsung harus mempertimbangkan perbedaan ukuran benda uji, molaritas aktivator, *curing*, serta komposisi agregat (Angelika dkk., 2023; Desimaliana, Widyaningsih, Kaltsum, dkk., 2025; Nath & Sarker, 2017; Widyaningsih dkk., 2023). Adapun hasil indikator perkembangan kuat tekan dan konsistensi hasil disajikan pada Tabel 5 dan Gambar 5.

Tabel 5. Indikator perkembangan kuat tekan dan konsistensi hasil

Umur (hari)	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	CV (%)	Indeks Terhadap 28 hari (%)	Kenaikan Interval (%)	Kenaikan Kumulatif (%)
7	13,81	1,23	8,91	58,3	-	0,0
14	17,53	1,57	8,95	74,1	26,9	26,9
28	23,67	3,00	12,67	100,0	35,0	71,4



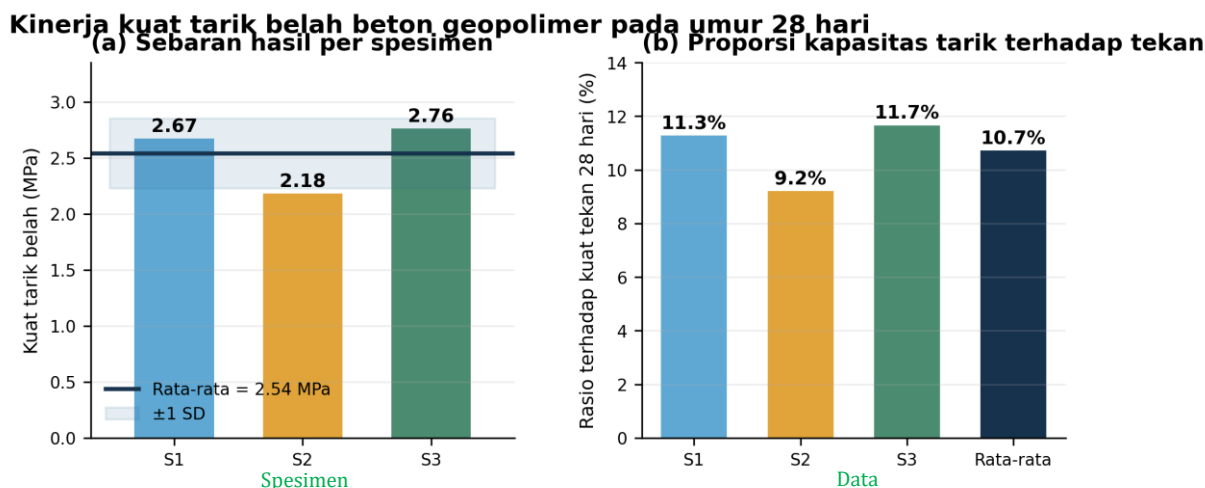
Gambar 5. Indeks kematangan mekanik dan persentase pertumbuhan kuat tekan

Kuat tarik belah dan hubungan terhadap kuat tekan

Kuat tarik belah rata-rata pada umur 28 hari mencapai 2,54 MPa dengan simpangan baku 0,31 MPa dan koefisien variasi 12,31% (Tabel 6 dan Gambar 6). Nilai individu berada pada rentang 2,18–2,76 MPa. Rasio kuat tarik belah terhadap kuat tekan rata-rata 28 hari berkisar antara 9,2–11,7%, dengan nilai rata-rata 10,7%. Rasio tersebut menunjukkan bahwa kapasitas tarik belah beton geopolimer berada di sekitar sepersepuluh dari kapasitas tekannya, sehingga penggantian 50% prekursor dengan CCR tidak menyebabkan respons kekuatan tarik belah menjadi tidak proporsional terhadap kekuatan tekan. Adapun hasil pengujian kuat tarik belah dan rasio terhadap kuat tekan disajikan pada Tabel 6 dan Gambar 6.

Tabel 6. Hasil pengujian kuat tarik belah dan rasio terhadap kuat tekan 28 hari

Data	Berat (kg)	Kuat Tarik Belah (MPa)	Rasio Terhadap Kuat Tekan 28 hari (%)
Spesimen 1	3.470	2,67	11,3
Spesimen 2	3.420	2,18	9,2
Spesimen 3	3.450	2,76	11,7
Rata-rata + SD	3.447	2,54 + 0,31	10,7



Gambar 6. Sebaran kuat tarik belah dan rasio kapasitas tarik terhadap kuat tekan 28 hari

Peran kalsium dalam beton geopolimer memberikan dua konsekuensi yang saling berkompetisi. Pada distribusi yang merata, produk reaksi kaya kalsium meningkatkan kepadatan pasta dan ikatan pasta-agregat, sehingga bidang retak harus menembus matriks yang lebih kompak. Sebaliknya, pengikatan yang terlalu cepat dapat menjebak rongga, menghasilkan aglomerasi, atau menciptakan zona dengan aktivasi tidak merata. Spesimen 2 yang menghasilkan 2,18 MPa dapat merefleksikan variasi lokal tersebut. Karena jumlah benda uji terbatas, interpretasi ini perlu dikonfirmasi melalui pengujian mikrostruktur, porositas, serta pengamatan zona transisi antarmuka.

Penelitian terdahulu mengenai beton geopolimer dengan serat *polypropylene* menunjukkan bahwa kekuatan tarik belah dapat ditingkatkan melalui mekanisme jembatan retak, sedangkan kekuatan tekan dapat menurun ketika *workability* memburuk (Desimaliana dkk., 2026). Apabila digunakan pendekatan dari penelitian serat *polypropylene*, maka penggunaan CCR pada penelitian ini bekerja terutama melalui perubahan kimia binder, bukan pengendalian retak secara mekanis. Temuan ini membuka peluang penelitian lanjutan yang mengombinasikan CCR pada kadar optimum dengan serat *polypropylene* dalam jumlah terbatas untuk menyeimbangkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kelecakan.

Pola keruntuhan kuat tekan dan kuat tarik belah

Pada benda uji kuat tekan, retak utama berkembang hampir sejajar dengan sumbu silinder dan arah pembebanan, disertai pengelupasan serta penghancuran lokal pada zona kontak pelat tekan (Gambar 7c). Pola tersebut termasuk kombinasi *columnar splitting* dan *end crushing*. Retak memanjang memperlihatkan kegagalan akibat tegangan tarik lateral yang muncul ketika benda uji silinder mengembang selama menerima beban aksial tekan, sedangkan kerusakan pada ujung dipengaruhi oleh konsentrasi tegangan dan tahanan gesek antara benda uji dan pelat mesin.



Gambar 7. Dokumentasi pengujian dan pola keruntuhan: (a) CTM; (b) uji tekan; (c) keruntuhan tekan; (d) penempatan tarik belah; (e) keruntuhan tarik belah; dan (f) bidang retak diametral

Keruntuhan tekan tidak menunjukkan satu bidang geser diagonal yang dominan. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme kerusakan berkembang melalui koalesensi retak mikro di dalam pasta dan zona transisi antarmuka, kemudian berlanjut menjadi retak longitudinal. Pengelupasan lokal pada bagian ujung tidak serta-merta menunjukkan mutu beton geopolimer yang rendah, tetapi menegaskan pentingnya kerataan permukaan, sentrisitas pembebanan, serta keseragaman pemadatan. Untuk penelitian lanjutan, *capping* yang lebih seragam dan dokumentasi 4 (empat) sisi benda uji disarankan agar klasifikasi pola keruntuhan dapat dilakukan secara kuantitatif.

Pada pengujian kuat tarik belah, spesimen terpisah menjadi dua bagian melalui retak yang relatif lurus sepanjang diameter pembebanan (Gambar 7d-f). Retak bermula pada zona tarik di sekitar garis tengah, kemudian merambat menuju kedua ujung silinder. Bidang pecah tampak kohesif dan agregat masih tertanam pada matriks. Sesuai catatan penelitian, tidak terdapat pelepasan agregat yang menonjol. Hal ini menunjukkan bahwa ikatan pasta-agregat cukup efektif; kegagalan lebih banyak terjadi melalui matriks dan zona transisi daripada melalui *debonding* agregat secara menyeluruh.

Kombinasi retak longitudinal pada uji tekan dan retak diametral yang bersih pada uji kuat tarik belah menggambarkan karakter beton geopolimer yang tetap getas: kapasitas kuat tekan berkembang tinggi, tetapi energi pascakeretakan terbatas karena tidak terdapat serat atau mekanisme jembatan retak. Meski demikian, rasio f_{ct}/f_c sebesar 10,7% dan agregat yang tetap tertahan pada bidang pecah memperlihatkan kompatibilitas mekanik yang baik antara prekursor *fly ash*-CCR dan agregat. Ringkasan diagnosis pola keruntuhan disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil pengujian kuat tarik belah dan rasio terhadap kuat tekan 28 hari

Pengujian	Ciri visual utama	Mekanisme dominan	Implikasi
Kuat Tekan	Retak memanjang; <i>spalling</i> dan <i>crushing</i> lokal pada ujung	Ekspansi lateral, tarik transversal, konsentrasi tegangan ujung	Matriks mampu menahan tekan, tetapi masih sensitif terhadap ketidakseragaman pemadatan dan kontak pelat
Kuat Tarik Belah	Retak lurus sepanjang diameter; dua belahan relatif bersih; agregat tetap tertanam	Tegangan tarik diametral dan propagasi retak melalui matriks/ITZ	Ikatan pasta-agregat memadai, namun respons pascakeretakan tetap getas

Kontribusi, keterbatasan, dan implikasi

Kontribusi utama penelitian adalah pembuktian eksperimental bahwa substitusi limbah karbit sebesar 50% pada fraksi prekursor tetap mampu menghasilkan kuat tekan rata-rata 23,67 MPa dan kuat tarik belah 2,54 MPa pada umur 28 hari. Analisis terintegrasi atas workability, pertumbuhan kekuatan, dispersi data, rasio tarik-tekan, dan pola keruntuhan memperlihatkan bahwa kinerja campuran tidak hanya ditentukan oleh nilai puncak, tetapi juga oleh kecepatan reaksi, homogenitas, serta kualitas ikatan pasta-agregat. Hal ini memperluas basis data mengenai pemanfaatan CCR berkadar tinggi pada beton geopolimer yang dirawat pada kondisi ruang.

Meskipun demikian, desain eksperimen belum menyediakan variasi 0%, 10%, 20%, 30%, atau 40% limbah karbit sebagai pembanding, sehingga penelitian ini belum dapat menetapkan kadar optimum atau besarnya perubahan terhadap beton geopolimer *fly ash* tanpa CCR. Jumlah 3 (tiga) spesimen per kondisi juga membatasi inferensi statistik. Penelitian lanjutan perlu memasukkan variasi kadar, kontrol tanpa CCR, pengukuran waktu ikat dan viskositas, kuat lentur, modulus elastisitas, absorpsi, porositas, SEM-EDS/XRD, serta evaluasi durabilitas. Variabel pencucian agregat kasar dan durasi antara pencampuran dan pencetakan juga perlu dikontrol karena berpotensi memengaruhi CV dan pola keruntuhan.

4. KESIMPULAN

Campuran beton geopolimer dengan prekursor *fly ash*-CCR pada proporsi 1:1 menunjukkan kelecakan tinggi namun tetap kohesif, disertai perkembangan kuat tekan yang berlanjut hingga umur 28 hari. Respons kuat tarik belah tetap sebanding dengan kapasitas tekan, sedangkan pola keruntuhan menunjukkan karakter getas dengan ikatan pasta-agregat yang tetap memadai. Variabilitas antarspesimen menegaskan pentingnya pengendalian homogenitas pencampuran, waktu kerja, dan pemadatan pada sistem yang kaya kalsium.

Kuat tekan rata-rata berkembang dari 13,81 MPa pada umur 7 hari menjadi 17,53 MPa pada umur 14 hari dan 23,67 MPa pada umur 28 hari. Campuran mencapai 58,3% dan 74,1% dari kuat tekan 28 hari masing-masing pada umur 7 dan 14 hari, dengan pertumbuhan kumulatif 71,4%. Kuat tarik belah rata-rata 2,54 MPa menghasilkan rasio 10,7% terhadap kuat tekan 28 hari. Nilai CV 8,91-12,67% menegaskan perlunya kontrol homogenitas dan waktu kerja.

Pola keruntuhan tekan berupa retak longitudinal dengan *crushing* lokal pada ujung, sedangkan uji tarik belah menghasilkan retak diametral yang relatif bersih dan agregat tetap tertanam pada bidang pecah. Secara teknis, campuran layak dipertimbangkan sebagai binder geopolimer mutu menengah dan sebagai strategi pemanfaatan residu industri. Namun, penetapan kadar optimum dan klaim peningkatan terhadap campuran kontrol harus menunggu penelitian dengan variasi kadar dan karakterisasi mikrostruktur yang lebih lengkap.

REFERENSI

- Amran, Y. H. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolimer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>
- Angelika, S. K., Desimaliana, E., & Khanza, M. (2023). Pengaruh Substitusi Parsial Variasi Tepung Kaca Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer. *RekaRacana: Jurnal Teknil Sipil*, 9(2), 70. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v9i2.70>
- Bawab, J., El-Hassan, H., El-Dieb, A., Khatib, J., & El-Mir, A. (2025). Utilization of calcium carbide residue as a concrete component: A comprehensive review. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04823. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.E04823>
- Desimaliana, E., Dharu, M. A., & Shima, R. D. (2025). STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER AKIBAT PENGARUH LIMBAH ABU TEMPURUNG KELAPA SEBAGAI BINDER. 2(2), 103-108. <https://doi.org/10.31934/jst.v2i1.10289>
- Desimaliana, E., Shima, R. D., & Musyaffa, F. (2024). Analisis Biaya terhadap Pengaruh Penggunaan Limbah Marmer dan Abu Sekam Padi pada Beton Geopolimer. *Journal of Sustainable Construction*, 3(2), 45-53. <https://doi.org/10.26593/josc.v3i2.7905>

- Desimaliana, E., Widyaningsih, E., & Kaltsum, A. Q. N. (2025). The effect of curing method on geopolymer concrete compressive strength. AIP Conference Proceedings, 3351(1). <https://doi.org/10.1063/5.0299754>
- Desimaliana, E., Widyaningsih, E., Kaltsum, A. Q. N., & Setiana, T. I. (2025). Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Metode Curing Pembasahan. Jurnal Proyek Teknik Sipil, 8(1), 1–8. <https://doi.org/10.14710/potensi.2025.25933>
- Desimaliana, E., Widyaningsih, E., & Syafira, T. H. (2026). Pengaruh Penambahan Serat Polypropylene terhadap Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton Geopolimer. Journal of Sustainable Construction, 5(2), 31–38. <https://doi.org/10.26593/josc.v5i2.10264>
- Diredja, N. V., Desimaliana, E., & Pranata, Y. A. (2026). Performance evaluation of steam and membrane curing on geopolymer mortar with fly ash and carbide waste. E3S Web of Conferences, 688, 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202668803001>
- Farooq, F., Jin, X., Faisal Javed, M., Akbar, A., Izhar Shah, M., Aslam, F., & Alyousef, R. (2021). Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review. Construction and Building Materials, 306, 124762. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124762>
- Hanjitsuwan, S., Phoo-ngernkham, T., Li, L. yuan, Damrongwiriyanupap, N., & Chindaprasirt, P. (2018). Strength development and durability of alkali-activated fly ash mortar with calcium carbide residue as additive. Construction and Building Materials, 162, 714–723. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.034>
- Hidayattulloh, T., & Desimaliana, E. (2025). PENGARUH OVEN CURING TERHADAP KUAT TEKAN MORTAR GEOPOLIMER DENGAN SUBSTITUSI LIMBAH KARBIT. JUMATISI (Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil), 6(1), 470–476. <https://doi.org/10.24127/jumatisi.v6i1.9315>
- Julphunthong, P., Joyklad, P., Manprom, P., Chompoorat, T., Palou, M. T., & Suriwong, T. (2024). Evaluation of calcium carbide residue and fly ash as sustainable binders for environmentally friendly loess soil stabilization. Scientific Reports, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51326-x>
- Kaltsum, A. Q. N., & Desimaliana, E. (2025). Studi Eksperimental Kuat Tekan Mortar Geopolimer Substitusi Limbah Kaca sebagai Filler dengan Metode Perawatan Membran. Jurnal Teknik Sipil MACCA, 10(2), 159–170. <https://doi.org/10.33096/w5ht8a61>
- Mohammed, A. A., Ahmed, H. U., & Mosavi, A. (2021). Survey of mechanical properties of geopolymer concrete: A comprehensive review and data analysis. Materials, 14(16). <https://doi.org/10.3390/ma14164690>
- Mualim, M. F., Desimaliana, E., & Shima, R. D. (2025). Pengaruh Penggunaan Abu Ampas Tebu Sebagai Substitusi Fly Ash Terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer. Jurnal Teknik Sipil Institut ..., 12(2), 186–193. <https://doi.org/10.21063/jts.2025.V1202.0186-193>
- Nath, P., & Sarker, P. K. (2017). Flexural strength and elastic modulus of ambient-cured blended low-calcium fly ash geopolymer concrete. Construction and Building Materials, 130, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.034>
- Pavithra, P., Srinivasula Reddy, M., Dinakar, P., Hanumantha Rao, B., Satpathy, B. K., & Mohanty, A. N. (2016). A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. Journal of Cleaner Production, 133, 117–125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.041>
- Pratama, N. A., & Desimaliana, E. (2024). Pengaruh Substitusi Parsial Limbah Bata Ringan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer. RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil, 10(1), 51–59. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v10i1.51>
- Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, 114, 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Rizka, M. N., & Arifin, A. S. (2025). Pemanfaatan Limbah Serbuk Kaca dan Keramik Sanitary pada Pasta Geopolymer Berbahan Dasar FlyAsh. RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil, 11(3), 291–297. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v11i3.291>
- Sandika, F. G., Desimaliana, E., & Dewi Shima, R. (2025). Pemanfaatan Limbah Kaca Sebagai Substitusi Filler Dalam Campuran Mortar Geopolimer. RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil, 11(01), 52–62.
- Wang, Q., Guo, H., Yu, T., Yuan, P., Deng, L., & Zhang, B. (2022). Utilization of Calcium Carbide Residue as Solid Alkali for Preparing Fly Ash-Based Geopolymers: Dependence of Compressive Strength and Microstructure on Calcium Carbide Residue, Water Content and Curing Temperature. Materials, 15(3). <https://doi.org/10.3390/ma15030973>
- Widyaningsih, E., Herbudiman, B., & Fauzi, F. F. (2023). Evaluasi Pengaruh Variasi Molaritas dan Rasio Alkali Aktivator terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer. RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil, 8(3), 176. <https://doi.org/10.26760/rekaracana.v8i3.176>