



STUDI EKSPERIMENTAL KUAT TARIK LENTUR BETON GEOPOLIMER DENGAN SUBSTITUSI PARSIAL LIMBAH KARBIT

Muhammad Daffa Fahrezi^{*1}, Erma Desimaliana¹, Altie Santika Arifin²

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jalan PHH Mustofa No. 23, Bandung 40124, Indonesia

²PT Dian Widya Enjiniring, Jl. Asia Afrika 133-137 Wisma Monex Lt. 9, Bandung 40112, Indonesia

*Penulis korespondensi: muhammad.daffa22@mhs.itenas.ac.id

DISUBMIT 6 Agustus 2026

DIREVISI 15 Agustus 2026

DITERIMA 16 Agustus 2026

ABSTRAK Beton geopolimer berbasis limbah industri berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland, tetapi kapasitas tarik lenturnya harus dipastikan karena retak awal pada elemen balok berkembang dari zona tarik. Penelitian ini mengevaluasi kuat tarik lentur beton geopolimer dengan prekursor 50% *fly ash* kelas F dan 50% limbah karbit. Proporsi agregat:binder adalah 60%:40%, prekursor:alkali aktivator 70%:30%, NaOH 10 M, dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 1:1. Tiga balok 150 mm × 150 mm × 600 mm dirawat dengan metode membran dan diuji pada umur 28 hari. Kuat tekan pada umur 28 hari sebesar 23,67 MPa digunakan secara terbatas sebagai parameter pendamping untuk mengevaluasi persamaan empiris kuat tarik lentur. Hasil pengujian balok mencapai 2,40–2,67 MPa dengan rata-rata 2,53 MPa, simpangan baku 0,14 MPa, dan koefisien variasi 5,33%. Persamaan SNI 2847:2019, $0,62\sqrt{f'_c}$, memprediksi 3,02 MPa atau 19,07% lebih tinggi daripada hasil eksperimen. Koefisien berbasis dataset yang diperoleh adalah $0,521\sqrt{f'_c}$. Retak berkembang relatif vertikal dari serat tarik bawah dan menunjukkan keruntuhan dominan lentur. Hasil ini merupakan benchmark kelayakan awal campuran, bukan bukti kausal peningkatan akibat limbah karbit karena tidak tersedia campuran kontrol.

KATA KUNCI beton geopolimer; limbah karbit; kuat tarik lentur; *modulus of rupture*; pola retak

1 LATAR BELAKANG

Dekarbonisasi material konstruksi mendorong pengembangan *binder* tanpa klinker yang memanfaatkan residu industri. Beton geopolimer terbentuk melalui aktivasi alkali terhadap prekursor kaya silika dan alumina, sehingga produk reaksi yang terbentuk dapat mengikat agregat tanpa menggunakan semen Portland sebagai pengikat utama [1]. Di Indonesia, *fly ash* kelas F banyak diteliti sebagai prekursor karena ketersediaan dan sifat pozolaniknya. Meskipun demikian, reaktivitas *fly ash* pada suhu ruang cenderung lambat dan sangat dipengaruhi oleh komposisi aktivator, kadar kalsium, metode perawatan, serta karakter fisik prekursor [2], [3], [4].

Limbah karbit atau *calcium carbide residue* merupakan residu proses pembentukan gas asetilena yang didominasi oleh senyawa berbasis kalsium. Dalam sistem *alkali-activated*, sumber kalsium dapat berinteraksi dengan aluminosilikat *fly ash* dan mendorong terbentuknya produk ikat kaya kalsium bersama gel aluminosilikat.

Literatur mutakhir menunjukkan bahwa penambahan residu karbit pada kadar yang sesuai dapat memodifikasi struktur gel, mempercepat pengerasan, dan meningkatkan kerapatan matriks; namun, kadar yang terlalu tinggi juga berpotensi mengganggu keseimbangan silika–alumina–kalsium dan menghasilkan heterogenitas [5], [6]. Dengan demikian, limbah karbit tidak dapat diperlakukan hanya sebagai bahan pengisi, tetapi sebagai prekursor sekunder yang pengaruhnya ditentukan oleh proporsi dan kondisi aktivasi.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa performa beton atau mortar geopolimer tidak hanya ditentukan oleh jenis limbah, tetapi juga oleh metode *curing*, rasio aktivator, serta posisi material substitusi sebagai *binder* atau *filler* [2], [3], [4], [7], [8], [9]. Perawatan membran dipilih untuk membatasi kehilangan kelembapan dan mempertahankan lingkungan reaksi pada suhu ruang. Pendekatan ini relevan untuk aplikasi lapangan karena tidak memerlukan energi pemanasan, walaupun peningkatan

kekuatan awalnya umumnya lebih lambat daripada *curing* termal [3], [4], [10], [11], [12].

Kuat tarik lentur merupakan parameter yang merepresentasikan tegangan nominal pada serat tarik ekstrem ketika balok mencapai beban puncak. Parameter ini lazim disebut *modulus of rupture* dan digunakan untuk menilai kecenderungan retak awal, mengevaluasi kinerja material pada pelat atau perkerasan, serta menyediakan parameter pendukung dalam perancangan elemen yang responsnya dipengaruhi oleh lentur [13], [14]. Berbeda dari kuat tekan yang diperoleh pada kondisi tegangan dominan tekan, kuat tarik lentur dipengaruhi oleh gradien tegangan sepanjang tinggi penampang, ukuran benda uji, posisi retak, konfigurasi pembebanan, dan cacat lokal pada zona tarik. Oleh sebab itu, nilai kuat tekan yang tinggi tidak selalu diikuti oleh peningkatan kuat tarik lentur secara proporsional [15], [16].

Pada beton geopolimer, kapasitas tarik lentur ditentukan oleh kemampuan matriks hasil aktivasi alkali untuk menahan inisiasi dan perambatan retak. Gel aluminosilikat yang terbentuk harus cukup homogen untuk mentransfer tegangan menuju agregat, sedangkan pori terperangkap, partikel *fly ash* yang belum bereaksi, retak susut mikro, dan zona transisi antarmuka yang lemah dapat menjadi lokasi konsentrasi tegangan. Tinjauan data mekanis geopolimer menunjukkan bahwa hubungan antara kuat tekan dan kuat tarik lentur memiliki sebaran yang lebih luas dibandingkan dengan beton semen Portland karena variasi prekursor, aktivator, metode *curing*, dan kondisi pengujian [15], [16]. Dengan demikian, penerapan persamaan empiris beton normal pada geopolimer perlu diperiksa menggunakan data eksperimen dari sistem *binder* yang sama.

Komposisi alkali aktivator berperan ganda terhadap respons lentur. Konsentrasi NaOH dan ketersediaan silikat menentukan tingkat pelarutan Si dan Al, sedangkan rasio cairan terhadap padatan mengendalikan viskositas dan porositas akhir. Aktivator yang terlalu

rendah dapat menyisakan prekursor yang tidak bereaksi, tetapi aktivator atau air berlebih dapat meningkatkan pori kapiler setelah pengerasan. Optimasi *fly ash geopolimer* memperlihatkan bahwa kecepatan dan lama pencampuran, molaritas NaOH, temperatur, serta durasi *curing* secara signifikan memengaruhi kuat tarik lentur [17]. Penelitian lain pada sistem *fly ash-slag* juga menunjukkan bahwa perubahan kandungan material kaya kalsium, modulus aktivator, dan rasio campuran dapat mengubah kuat tekan dan kuat lentur melalui perubahan densitas gel dan struktur pori [18].

Limbah karbit memasok kalsium dalam jumlah tinggi sehingga berpotensi membentuk produk reaksi kaya kalsium bersama jaringan aluminosilikat. Mekanisme tersebut dapat mempercepat pengerasan dan memperbaiki ikatan matriks-agregat, tetapi penambahan kalsium tidak selalu meningkatkan ketahanan retak. Matriks yang menjadi lebih padat dan kaku dapat tetap menunjukkan keruntuhan getas apabila terdapat ketidakseragaman reaksi atau retak mikro. Shi et al. [5] melaporkan kuat lentur 1,79 MPa dan kuat tekan 15,1 MPa pada geopolimer berbasis *fly ash*, *red mud*, dan *carbide slag*; koefisien sederhananya sekitar $0,461\sqrt{f'_c}$. Nilai tersebut memberi konteks bahwa sistem yang mengandung residu karbit dapat memiliki koefisien lentur lebih rendah daripada $0,62\sqrt{f'_c}$, walaupun perbedaan bahan, geometri, dan prosedur pengujian tidak memungkinkan perbandingan langsung.

Penelitian lainnya tentang beton geopolimer masih lebih banyak menilai kuat tekan dan *workability*, sedangkan data kuat tarik lentur, variasi antarbenda uji, serta dokumentasi bidang patahan relatif terbatas. Lie dan Rachmansyah [19] memperoleh hubungan $0,62\sqrt{f'_c}$ pada beton geopolimer *fly ash* dengan *superplasticizer*, yang menunjukkan bahwa kesetaraan terhadap persamaan beton normal mungkin dicapai pada komposisi tertentu. Sebaliknya, kompilasi 726 observasi oleh Malkawi [15]

menegaskan bahwa model empiris beton semen Portland tidak secara konsisten mewakili seluruh variasi beton geopolimer. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa koefisien kuat tarik lentur perlu dipahami sebagai fungsi sistem binder, tingkat reaksi, dan kualitas pemadatan, bukan sebagai konstanta universal.

Perawatan membran pada suhu ruang dipilih karena lebih realistis untuk aplikasi lapangan dibandingkan dengan curing termal. Namun, metode ini membuat perkembangan gel sangat bergantung pada kelembapan internal dan reaktivitas prekursor. Pada campuran yang kental, keberhasilan pemadatan juga menjadi penting karena rongga pada zona tarik balok dapat menurunkan beban retak secara tajam. Oleh karena itu, pembacaan kuat tarik lentur harus mencakup bukan hanya nilai rata-rata, tetapi juga dispersi data, posisi retak, dan kondisi permukaan patahan agar penyebab keterbatasan kapasitas dapat ditafsirkan secara hati-hati.

Berdasarkan kondisi tersebut, kesenjangan ilmiah penelitian terletak pada belum tersedianya data terfokus mengenai kuat tarik lentur beton geopolimer dengan precursor 50% *fly ash*–50% limbah karbit yang dirawat secara membran, berikut evaluasi kesesuaian persamaan empiris beton normal. Analisis kuat tekan dalam artikel ini dibatasi pada umur 28 hari dan hanya dipakai sebagai variabel pendamping pada hubungan $f_r - \sqrt{f'_c}$. Pembatasan ini menjaga fokus artikel pada respons lentur serta menghindari pengulangan pembahasan sifat mekanik lain yang tidak diperlukan untuk tujuan penelitian.

Artikel ini secara khusus memusatkan analisis pada kuat tarik lentur, dengan kuat tekan umur 28 hari hanya digunakan untuk melengkapi evaluasi persamaan empiris.

Kontribusi ilmiahnya meliputi: (1) penyediaan benchmark kuat tarik lentur campuran *hybrid fly ash*–limbah karbit yang dirawat secara membran; (2) evaluasi variabilitas tiga balok tanpa menghilangkan data yang menyimpang dari rerata; (3) dokumentasi lokasi retak, orientasi bidang patahan, dan kecenderungan agregat pecah atau tercabut; serta (4) derivasi koefisien $f_r = k\sqrt{f'_c}$ yang secara eksplisit dibatasi untuk dataset penelitian. Karena hanya satu komposisi prekursor yang diuji tanpa campuran kontrol 100% *fly ash*, penelitian tidak menyimpulkan bahwa substitusi 50% limbah karbit meningkatkan kuat tarik lentur. Hasilnya diposisikan sebagai verifikasi kelayakan awal dan dasar penyusunan eksperimen komparatif berikutnya.

2 METODE PENELITIAN

Material dan Proporsi Campuran. Material pengikat terdiri atas *fly ash* kelas F dari PLTU Paiton dan limbah karbit dari bengkel las karbit di Kota Bandung. Limbah karbit dikeringkan, dihancurkan, dan diayak hingga lolos saringan No. 200 sebelum digunakan sebagai prekursor. Berat jenis *fly ash* dan limbah karbit masing-masing tercatat 2,584 dan 2,353. Agregat halus dan agregat kasar digunakan sebagai pengisi campuran, sedangkan larutan alkali tersusun atas natrium hidroksida (NaOH) 10 M dan natrium silikat (Na_2SiO_3).

Proporsi agregat terhadap binder ditetapkan 60%:40% berdasarkan volume. Di dalam binder, prekursor dan alkali aktivator diproporsikan 70%:30%. Prekursor terdiri atas 50% *fly ash* dan 50% limbah karbit. Rasio massa Na_2SiO_3 :NaOH yang digunakan dalam pelaksanaan campuran adalah 1:1, yang dipilih melalui uji pasta pendahuluan untuk memperoleh konsistensi dan waktu ikat yang dapat dikerjakan. Proporsi bahan untuk satu balok ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Proporsi material untuk satu benda uji balok

Material	Massa (kg)	Peran
Agregat kasar	12,637	Pengisi
Agregat halus	8,314	Pengisi
Fly ash	5,372	Prekursor
Limbah karbit	4,885	Prekursor
NaOH 10 M	3,742	Aktivator
Na ₂ SiO ₃	4,276	Aktivator

Pencampuran dilakukan dengan menghomogenkan agregat dan prekursor kering terlebih dahulu. Larutan alkali kemudian ditambahkan secara bertahap hingga terbentuk campuran yang seragam. Karakter beton segar dievaluasi melalui diameter sebar; nilai rata-rata yang diperoleh sebesar 555 mm. Walaupun sebarannya relatif besar, pengamatan saat pengecoran menunjukkan campuran tetap kental dan lengket, karakter yang umum dijumpai pada geopolimer berkadar padat tinggi.

Benda Uji dan Perawatan. Benda uji utama berupa tiga balok berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm. Setelah pengecoran dan pemadatan, benda uji dibiarkan selama sekitar 24 jam sebelum dilepas dari cetakan. Selanjutnya, balok dibungkus dengan plastik kedap dan dirawat dengan metode membran hingga umur 28 hari. Pembungkusan dimaksudkan untuk membatasi penguapan larutan dan mempertahankan kelembapan internal selama reaksi geopolimerisasi. Sebagai data pendamping untuk persamaan empiris, digunakan kuat tekan rata-rata silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm pada umur 28 hari.

Pengujian dan Analisis Data. Pengujian kuat tarik lentur dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* dengan pembebanan dua titik sesuai prinsip SNI 4431:2011 [13]. Balok diletakkan pada dua tumpuan dan beban diberikan secara monoton hingga terbentuk retak utama dan kapasitas puncak tercapai. Konfigurasi alat dan posisi benda uji ditunjukkan pada Gambar 1.

Apabila retak terjadi di dalam sepertiga tengah bentang, kuat tarik lentur dihitung

menggunakan Persamaan (1). Untuk retak di luar sepertiga tengah tetapi jaraknya dari garis tengah tidak melebihi 5% panjang bentang, digunakan Persamaan (2) [20].

$$f_r = \frac{PL}{bh^2} \quad (1)$$

$$f_r = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (2)$$

dengan f_r adalah kuat tarik lentur (MPa), P beban maksimum (N), L bentang tumpuan (mm), b lebar balok (mm), h tinggi balok (mm), dan a jarak rata-rata antara garis retak dan tumpuan terdekat (mm). Hasil tiga benda uji dianalisis menggunakan rata-rata, simpangan baku sampel, dan koefisien variasi. Nilai eksperimen juga dibandingkan dengan persamaan *modulus of rupture* untuk beton normal pada SNI 2847:2019 [14]:

$$f_{r,SNI} = 0,62\lambda\sqrt{f'_c} \quad (3)$$

Pada Persamaan (3), $\lambda = 1,0$ digunakan karena benda uji memakai agregat normal. Evaluasi ulang dalam artikel ini mengikuti koefisien 0,62 pada Pasal 19.2.3.1 SNI 2847:2019 [21].

Perbandingan tersebut tidak dimaksudkan untuk memvalidasi ulang SNI, melainkan untuk mengevaluasi apakah persamaan yang dikalibrasi bagi beton normal memberikan estimasi konservatif atau nonkonservatif terhadap campuran geopolimer yang diuji. Pola retak dan permukaan patahan dievaluasi secara visual dari arah perambatan retak, posisi bidang patahan, serta kecenderungan agregat pecah atau tercabut. Interpretasi mikrostruktur dibatasi sebagai dugaan berbasis literatur karena penelitian tidak melakukan XRD, SEM, atau analisis kimia produk reaksi.



Gambar 1 Konfigurasi pengujian kuat tarik lentur

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Kuat Tekan Umur 28 Hari sebagai Parameter Empiris. Kuat tekan rata-rata silinder pada umur 28 hari sebesar 23,67 MPa. Nilai ini tidak dibahas sebagai perkembangan kekuatan terhadap umur, tetapi digunakan sebagai parameter pendamping pada bentuk hubungan $f_r = k\sqrt{f_c}$. Penggunaan umur yang sama dengan

pengujian balok menghindari pencampuran respons material dari tingkat kematangan yang berbeda. Data 28 hari juga sesuai dengan umur acuan yang umum dipakai untuk membandingkan sifat mekanik beton. Rekapitulasi parameter yang digunakan dalam analisis empiris ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Rekapitulasi sifat mekanik campuran

Parameter	Umur (hari)	Rata-rata (MPa)
Kuat tekan	28	23,67
Kuat tarik lentur	28	2,53

Pada umur yang sama, kuat tarik lentur rata-rata 2,53 MPa setara dengan 10,70% dari kuat tekan 23,67 MPa. Rasio linear tersebut hanya memberikan gambaran skala relatif kedua parameter; evaluasi persamaan empiris dilakukan menggunakan bentuk akar kuadrat kuat tekan karena bentuk ini digunakan pada SNI 2847:2019. Dengan demikian, kuat tekan dalam artikel tidak diperlakukan sebagai hasil utama, melainkan sebagai variabel pembanding untuk menilai apakah persamaan beton normal memberikan estimasi yang aman bagi campuran geopolimer yang diuji.

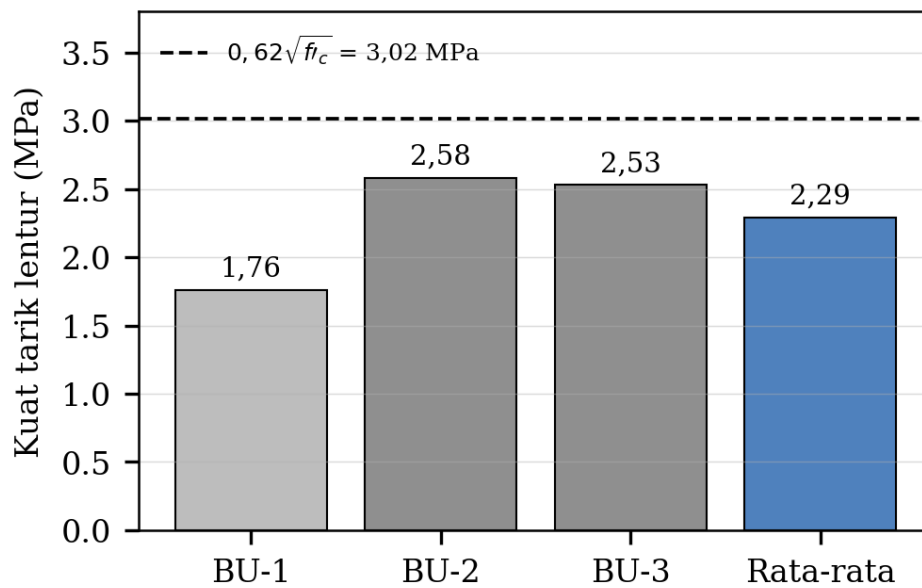
Kuat Tarik Lentur dan Variabilitas. Beban maksimum ketiga balok berada pada

rentang 18–20 kN. Berdasarkan koreksi data pengujian, kuat tarik lentur BU-1, BU-2, dan BU-3 masing-masing sebesar 2,40 MPa, 2,67 MPa, dan 2,53 MPa. Urutan nilai kuat lentur tidak sepenuhnya mengikuti urutan beban maksimum karena perhitungan mempertimbangkan lokasi retak terhadap tumpuan. Pada balok dengan bidang retak di luar sepertiga tengah yang masih memenuhi batas SNI 4431:2011 [13], jarak a pada Persamaan (2) memengaruhi nilai akhir. Nilai rata-rata 2,53 MPa disertai simpangan baku 0,14 MPa dan koefisien variasi 5,33%. Rekapitulasi hasil disajikan pada Tabel 3 dan Gambar 2.

Tabel 3 Hasil pengujian kuat tarik lentur umur 28 hari

Benda uji	P maks. (kN)	f_r (MPa)	Deviasi dari rerata
BU-1	18	2,40	-5,26%
BU-2	20	2,67	+5,39%
BU-3	19	2,53	-0,13%

Rata-rata	19	2,53	—
-----------	----	------	---



Gambar 2 Kuat tarik lentur eksperimen dan prediksi SNI

Koefisien variasi 5,33% menunjukkan bahwa respons lentur ketiga benda uji relatif seragam. BU-1 berada 5,26% di bawah rerata, BU-2 berada 5,39% di atas rerata, sedangkan BU-3 hanya 0,13% di bawah rerata. Selisih maksimum–minimum sebesar 0,27 MPa atau 10,66% dari nilai rata-rata. Tidak terdapat satu benda uji yang menyimpang tajam dari kelompok data. Meskipun demikian, keseragaman pada tiga replikasi belum cukup untuk mewakili variasi produksi dalam skala yang lebih luas, sehingga interpretasi statistik tetap dibatasi pada batch penelitian ini.

Dengan tiga replikasi, interval kepercayaan 95% untuk rata-rata berdasarkan distribusi t berada pada kisaran 2,20–2,87 MPa. Rentang tersebut tidak dimaksudkan sebagai nilai karakteristik desain, melainkan menunjukkan ketidakpastian rata-rata akibat jumlah sampel yang terbatas. Untuk tujuan perumusan persamaan desain, jumlah sampel perlu ditambah dan pengujian harus dilakukan pada beberapa batch agar variasi pencampuran, pemadatan, serta *curing* dapat dipisahkan dari variasi material.

Dispersi yang relatif rendah memberikan indikasi bahwa proses pencampuran, pemadatan, dan pengujian pada ketiga balok berlangsung cukup konsisten. Namun, kuat tarik lentur tetap dikendalikan oleh cacat kritis pada serat tarik; rongga, aglomerasi prekursor, atau zona pasta yang kurang padat dapat memicu retak sebelum kapasitas matriks termobilisasi. Campuran segar memiliki diameter sebar 555 mm, tetapi dilaporkan kental dan lengket. Nilai sebar yang besar tidak selalu menjamin pelepasan udara yang efektif; karena itu, kontrol energi pemadatan dan pemeriksaan densitas setiap balok tetap diperlukan pada penelitian berikutnya.

Dari sudut pandang desain eksperimen, tiga balok cukup untuk memperoleh indikasi awal dan mendokumentasikan mode retak, tetapi belum memadai untuk menghasilkan nilai karakteristik atau persamaan umum. Penelitian komparatif antarkadar limbah karbit sebaiknya menggunakan sedikitnya lima sampai enam replikasi per variasi, berasal dari lebih dari satu *batch*, dan menerapkan prosedur penerimaan data yang ditetapkan sebelum pengujian. Kurva beban–lendutan atau beban–*crack mouth opening displacement* juga diperlukan agar

perubahan kuat puncak dapat dibedakan dari perubahan toughness dan ketahanan pascaretak.

Evaluasi Persamaan Empiris. Dengan kuat tekan rata-rata umur 28 hari sebesar 23,67 MPa dan $\lambda = 1,0$, Persamaan (3) menghasilkan $f_{r,SNI} = 3,02$ MPa. Nilai ini 0,48 MPa lebih tinggi atau 19,07% daripada rata-rata eksperimen. Rasio $f_{r,eksperimen}/f_{r,SNI}$ adalah 0,840. Jika hubungan berbentuk $k\sqrt{f'_c}$ dipaksakan pada satu titik data, diperoleh $k = 0,521$. Koefisien individual ketiga balok berada pada kisaran 0,493–0,549; rentang yang relatif sempit ini konsisten dengan koefisien variasi hasil pengujian. Representasi empiris khusus campuran yang diuji dapat ditulis:

$$f_r = 0,521\sqrt{f'_c} \quad (4)$$

Persamaan (4) tidak boleh langsung digunakan sebagai persamaan desain karena diturunkan dari satu komposisi, satu umur, satu nilai kuat tekan rata-rata, dan tiga hasil balok. Nilainya hanya berfungsi sebagai deskriptor dataset. Walaupun demikian, selisih terhadap SNI memiliki implikasi penting: penggunaan langsung $0,62\sqrt{f'_c}$ pada campuran ini menghasilkan prediksi yang tidak konservatif terhadap nilai rata-rata eksperimen. Temuan tersebut sejalan dengan kajian berbasis 726 observasi yang menunjukkan bahwa persamaan beton semen Portland tidak selalu merepresentasikan sifat mekanik beton geopolimer secara konsisten [15].

Perbandingan dengan penelitian terdahulu memperlihatkan bahwa koefisien k sangat bergantung pada sistem material. Lie dan Rachmansyah [19] melaporkan hubungan sekitar $0,62\sqrt{f'_c}$ pada beton geopolimer *fly ash* dengan tambahan superplasticizer. Sementara itu, data Shi et al. [5] pada geopolimer *fly ash-red mud-carbide slag* menghasilkan koefisien kontekstual sekitar 0,461, lebih rendah daripada koefisien 0,521 pada penelitian ini. Perbedaan tersebut tidak dapat ditafsirkan sebagai pengaruh tunggal limbah kaya kalsium karena komposisi, ukuran spesimen, dan kondisi

curing berbeda, tetapi menegaskan bahwa hubungan kuat lentur tidak bersifat universal untuk seluruh beton geopolimer.

Malkawi [15] menekankan perlunya model khusus geopolimer berdasarkan kompilasi data besar, sedangkan Mohammed et al. [16] menunjukkan bahwa sifat mekanik geopolimer memiliki rentang luas akibat banyaknya kombinasi prekursor dan aktivator. Pada level campuran, penelitian optimasi juga memperlihatkan bahwa molaritas NaOH, temperatur dan waktu *curing*, serta kondisi pencampuran dapat mengubah kuat tarik lentur secara signifikan [17]. Oleh karena itu, persamaan empiris yang kuat perlu dibangun dari beberapa kadar limbah karbit, beberapa tingkat kuat tekan, dan jumlah sampel yang cukup untuk mengestimasi ketidakpastian model.

Secara mekanistik, kuat tekan merepresentasikan respons matriks pada keadaan tegangan dominan tekan, sedangkan kuat tarik lentur sangat sensitif terhadap cacat terbesar di serat tarik. Sumber kalsium dari limbah karbit dapat mendukung pembentukan gel C-(A)-S-H atau produk kaya kalsium yang berdampingan dengan jaringan aluminosilikat [5], [6]. Produk tersebut dapat meningkatkan densitas dan kekakuan, tetapi tidak otomatis meningkatkan kapasitas retak apabila reaksi tidak homogen. Matriks yang lebih kaku namun getas dapat mempertahankan kuat tekan menengah sambil menunjukkan kuat lentur yang lebih rendah daripada prediksi beton normal. Karena itu, evaluasi material geopolimer untuk elemen lentur tidak dapat dihentikan pada kuat tekan saja.

Korelasi kuat tekan–kuat lentur juga perlu dibedakan dari mekanisme pascaretak. Pada beton tanpa serat, setelah retak utama terbentuk, kapasitas turun cepat karena tidak tersedia mekanisme *crack bridging* yang berarti. Studi geopolimer berserat menunjukkan bahwa serat baja atau polimer dapat meningkatkan kuat lentur, defleksi ultimit, dan energi fraktur melalui penyaluran tegangan melintasi retak [13]–[18]. Campuran penelitian ini tidak

menggunakan serat; oleh sebab itu, nilai yang diperoleh merepresentasikan kontribusi matriks, agregat, dan antarmuka secara langsung. Hal ini membuat data relevan sebagai *baseline* sebelum strategi peningkatan *toughness* diterapkan.

Pola Retak dan Permukaan Patahan.

Gambar 3 menunjukkan bahwa retak utama pada ketiga balok tidak seluruhnya berada tepat di tengah bentang. Retak bermula dari permukaan bawah sebagai zona tarik dan merambat relatif vertikal menuju zona tekan. Orientasi yang hampir tegak lurus terhadap sumbu balok serta tidak adanya bidang diagonal dominan menunjukkan bahwa keruntuhan dikendalikan oleh lentur, bukan geser. Posisi retak yang bergeser mendekati salah satu titik pembebanan telah diperhitungkan melalui jarak a pada

Persamaan (2), sehingga hasil tidak semata-mata ditentukan oleh beban maksimum.

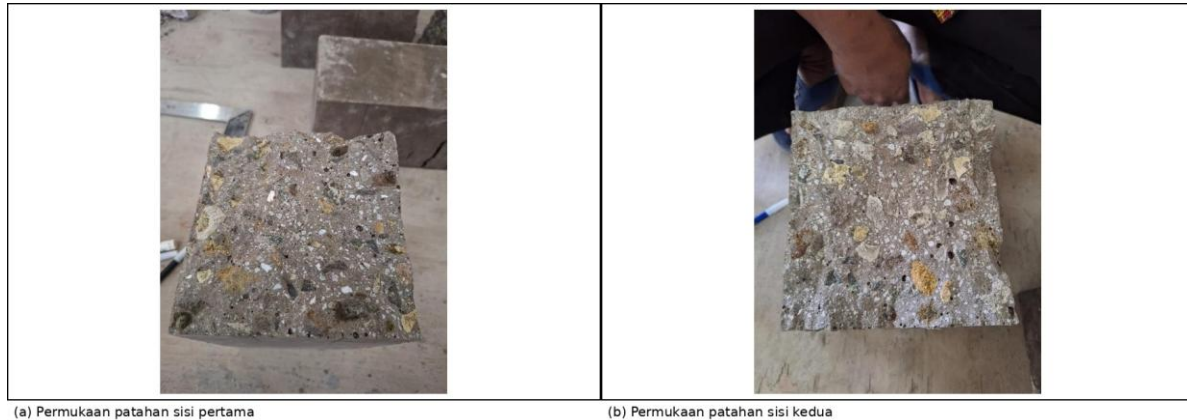
Inisiasi dari serat bawah sesuai dengan distribusi tegangan pada pembebanan dua titik: daerah di antara dua titik beban mengalami momen relatif konstan dan gaya geser rendah. Retak dapat muncul pada lokasi cacat paling kritis di wilayah tersebut, tidak harus tepat pada garis tengah. Perbedaan lokasi retak antarbenda uji memperkuat indikasi bahwa heterogenitas lokal berperan terhadap variasi nilai. Dokumentasi yang lebih kuat pada penelitian berikutnya dapat dilakukan dengan *digital image correlation* atau pengukuran *crack mouth opening displacement* untuk merekam evolusi retak sebelum dan sesudah beban puncak.



Gambar 3 Lokasi dan orientasi bidang retak balok

Pada permukaan patahan (Gambar 4), sebagian agregat kasar tampak terbelah bersama matriks dan tidak seluruhnya tercabut dari pasta. Secara visual, kondisi ini mengindikasikan bahwa *interfacial transition zone* (ITZ) bukan satu-satunya bidang lemah. Patahan yang melewati agregat dapat terjadi ketika ikatan pasta-agregat cukup kuat atau ketika agregat memiliki bidang lemah internal. Namun, pengamatan makro tidak dapat menentukan proporsi pasti antara patahan kohesif dalam matriks, patahan pada ITZ, dan pecahnya agregat.

Permukaan patahan juga tampak tidak seragam, dengan area pasta yang relatif padat berdampingan dengan rongga dan partikel yang belum sepenuhnya menyatu. Kondisi tersebut konsisten dengan karakter campuran geopolimer yang kental, tetapi tidak cukup untuk menyimpulkan tingkat porositas. Pengujian absorpsi, densitas lokal, *ultrasonic pulse velocity*, atau analisis citra penampang akan membantu menguji apakah balok dengan kuat lentur terendah memiliki volume rongga lebih besar pada zona tarik.



Gambar 4 Tekstur permukaan patahan setelah pengujian

Literatur melaporkan bahwa sistem *fly ash* dengan residu karbit dapat menghasilkan kombinasi gel aluminosilikat dan gel kaya kalsium, yang berpotensi memperbaiki densitas matriks serta ikatan agregat [5], [6]. Hasil visual pada penelitian ini konsisten dengan kemungkinan tersebut, tetapi tidak membuktikannya. Verifikasi mekanisme memerlukan XRF untuk komposisi prekursor, XRD/FTIR untuk produk reaksi, SEM-EDS untuk morfologi dan rasio unsur, serta pengujian porositas. Pemisahan yang tegas antara hasil observasi dan mekanisme literatur penting agar interpretasi tidak melampaui bukti eksperimen.

Kontribusi, Keterbatasan, dan Implikasi.

Kontribusi utama penelitian bukan penentuan kadar optimum, melainkan penyediaan data dasar *flexural performance* untuk campuran geopolimer *hybrid fly ash*–limbah karbit yang belum banyak dilaporkan pada penelitian nasional. Kuat tekan umur 28 hari digunakan secara terbatas untuk menguji hubungan empiris, sedangkan hasil utama mencakup kuat tarik lentur tiap balok, ukuran dispersi, posisi retak, dan kondisi permukaan patahan. Kombinasi data kuantitatif dan observasi visual memberikan dasar yang lebih lengkap dibandingkan pelaporan nilai rata-rata saja.

Dari sisi penerapan, hasil rata-rata 2,53 MPa menunjukkan bahwa campuran mampu memikul tegangan lentur awal, tetapi penggunaannya pada elemen struktural belum dapat direkomendasikan hanya dari dataset ini. Nilai desain membutuhkan

faktor reduksi yang mempertimbangkan variabilitas, pengaruh ukuran, kondisi lingkungan, dan konsistensi produksi. Prediksi SNI yang 19,07% lebih tinggi daripada hasil eksperimen menegaskan bahwa spesifikasi berbasis kuat tekan saja berpotensi melebihi kapasitas retak apabila tidak disertai pengujian lentur langsung.

Keterbatasan penelitian meliputi lima hal. Pertama, tidak terdapat campuran kontrol 100% *fly ash* sehingga efek kausal substitusi limbah karbit tidak dapat dihitung. Kedua, hanya satu kadar substitusi 50% dan tiga replikasi balok yang diuji. Ketiga, kuat tekan pendamping hanya tersedia sebagai nilai rata-rata sehingga variasi silinder tidak dapat dipropagasikan ke ketidakpastian koefisien k . Keempat, tidak tersedia kurva beban–lendutan sehingga kekakuan pascaretak, *toughness*, dan energi fraktur tidak dapat dianalisis. Kelima, tidak dilakukan karakterisasi kimia dan mikrostruktur sehingga penjelasan produk gel hanya bersandar pada literatur.

Penelitian lanjutan disarankan memakai seri limbah karbit 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50% dengan rasio aktivator yang dikontrol; setiap variasi perlu dibuat pada lebih dari satu batch dengan replikasi yang memadai. Pengukuran beban–CMOD atau beban–lendutan perlu ditambahkan untuk memperoleh energi fraktur, sedangkan densitas dan porositas tiap balok digunakan untuk menjelaskan dispersi. Analisis XRF, XRD, FTIR, SEM–EDS, dan komposisi produk

reaksi dapat menghubungkan kadar kalsium dengan perubahan ITZ dan mode patahan. Dengan desain tersebut, kadar optimum dapat ditetapkan berdasarkan keseimbangan *workability*, kuat tekan 28 hari, kuat tarik lentur, ketahanan retak, dan konsistensi hasil.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan analisis pembahasan, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Beton geopolimer dengan prekursor 50% *fly ash* dan 50% limbah karbit, NaOH 10 M, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$ 1:1, serta *curing membrane* menghasilkan kuat tarik lentur umur 28 hari sebesar 2,40–2,67 MPa. Nilai rata-rata 2,53 MPa memiliki simpangan baku 0,14 MPa dan koefisien variasi 5,33%, yang menunjukkan respons relatif seragam pada tiga benda uji, meskipun jumlah sampel masih terbatas.
- Kuat tekan umur 28 hari sebesar 23,67 MPa digunakan hanya sebagai parameter pendamping persamaan empiris. Persamaan SNI 2847:2019, $0,62\lambda\sqrt{f'_c}$ dengan $\lambda = 1,0$, memprediksi kuat tarik lentur 3,02 MPa atau 19,07% lebih tinggi daripada hasil eksperimen. Koefisien $0,521\sqrt{f'_c}$ hanya berlaku sebagai deskriptor campuran dan dataset penelitian ini.
- Retak berawal dari serat tarik bawah dan merambat relatif vertikal sehingga mode keruntuhan didominasi lentur. Agregat yang tampak terbelah pada permukaan patahan memberi indikasi visual bahwa ITZ bukan satu-satunya bidang lemah, tetapi mekanismenya belum dapat dipastikan tanpa pengujian mikrostruktur dan porositas.
- Campuran 50%:50% menunjukkan kelayakan awal untuk dikembangkan, tetapi penelitian belum dapat menyimpulkan bahwa limbah karbit meningkatkan kuat tarik lentur karena tidak terdapat campuran kontrol. Validasi memerlukan variasi kadar substitusi, jumlah sampel lebih besar, kurva beban–

lendutan, serta karakterisasi kimia dan mikrostruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. L. Provis, "Alkali-activated materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 114, pp. 40–48, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.CEMCONRES.2017.02.009.
- [2] E. Desimaliana, "Studi Eksperimental Kuat Tekan Beton Geopolimer dengan Metode Curing Pembasahan," *Jurnal Proyek Teknik Sipil*, 2025, [Online]. Available: <https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/potensi/article/view/25933>
- [3] N. V. Diredja, E. Desimaliana, and Y. A. Pranata, "Performance evaluation of steam and membrane curing on geopolimer mortar with fly ash and carbide waste," *E3S Web of Conferences*, vol. 688, p. 03001, 2026, doi: 10.1051/e3sconf/202668803001.
- [4] E. Desimaliana, E. Widyaningsih, and A. Q. N. Kaltsum, "The effect of curing method on geopolimer concrete compressive strength," in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, Nov. 2025. doi: 10.1063/5.0299754.
- [5] Y. Shi, Z. Zhang, Z. Sang, and Q. Zhao, "Microstructure and Composition of Red Mud-Fly Ash-Based Geopolymers Incorporating Carbide Slag," *Front. Mater.*, vol. Volume 7-2020, 2020, doi: 10.3389/fmats.2020.563233.
- [6] T. O. Mohammed, D. Singh, and E. O. Fanijo, "Calcium Carbide Residue as a Supplementary Precursor is Geopolymer Binders," *Front. Mater.*, vol. Volume 12-2025, 2025, doi: 10.3389/fmats.2025.1718575.
- [7] E. Desimaliana, A. R. Ma'aruf, and ..., "Analisis Serbuk Cangkarang Kerang Sebagai Substitusi Binder Terhadap Campuran Mortar Geopolimer," *Journal of Sustainable ...*, 2025, [Online]. Available: <https://journal.unpar.ac.id/index.php/josc/article/view/9258>

- [8] S. K. Angelika, E. Desimaliana, and M. Khanza, "Pengaruh Substitusi Parsial Variasi Tepung Kaca Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 9, no. 2, p. 70, 2023, doi: 10.26760/rekaracana.v9i2.70.
- [9] N. A. Pratama and E. Desimaliana, "Pengaruh Substitusi Parsial Limbah Bata Ringan terhadap Kuat Tekan Mortar Geopolimer," *RekaRacana: Jurnal Teknik Sipil*, 2024, [Online]. Available: <https://ejurnal.itenas.ac.id/index.php/rekaracana/article/view/11370>
- [10] E. Hanani, I. Satyarno, and D. Sulisty, "Mix Design of Ambient Cured Geopolymer Concrete with Fly Ash, GGBFS, and Borax," *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, vol. 20, no. 2, pp. 265–276, Dec. 2024, doi: 10.21831/inersia.v20i2.74464.
- [11] J. Hartono, L. L. F. H., A. B. U., and H. T. S., "Komparasi Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash Dengan Metode Curing Oven dan Suhu Ruang," *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 12, no. 2, pp. 383–394, Oct. 2022, doi: 10.29103/tj.v12i2.714.
- [12] B. R. Indriyantho, P. Purwanto, and R. Riko, "Mechanical Performance Analysis of Geopolymer Concrete using Fly Ash Tanjung Jati B for Sustainable Construction Materials," *TEKNIK*, vol. 44, no. 1, pp. 39–45, May 2023, doi: 10.14710/teknik.v44i1.52958.
- [13] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 4431:2011 Cara uji kuat lentur beton normal dengan dua titik pembebanan," Jakarta, 2011. [Online]. Available: www.bsn.go.id
- [14] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD)," Jakarta, 2019.
- [15] A. B. Malkawi, "Assessing Engineering Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Empirical Modeling," *Infrastructures (Basel)*, vol. 10, no. 7, Jul. 2025, doi: 10.3390/infrastructures10070168.
- [16] A. A. Mohammed, H. U. Ahmed, and A. Mosavi, "Survey of mechanical properties of geopolymer concrete: A comprehensive review and data analysis," *Materials*, vol. 14, no. 16, pp. 1–29, Aug. 2021, doi: 10.3390/ma14164690.
- [17] A. A. Siyal, R. M. Hamidi, R. M. Shamsuddin, R. M. S. R. Mohamed, and S. U. Ilyas, "Optimization of flexural strength in fly ash-based geopolymers through response surface methodology," *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*, vol. 16, no. 4, pp. 1706–1718, Dec. 2025, doi: 10.1007/s43995-025-00205-1.
- [18] Z. Zhang et al., "The Influence of Fly Ash and Slag on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete," *Buildings*, vol. 14, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.3390/buildings14092720.
- [19] E. S. Lie and R. Rachmansyah, "Rasio Nilai Kuat Lentur pada Beton Geopolimer dengan Penambahan Superplasticizer," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 19, no. 2, pp. 265–77, Oct. 2023, doi: 10.28932/jts.v19i2.6205.

