

Analisis Sifat Mekanik Beton Geopolimer dengan Abu Ampas Tebu sebagai Substitusi Parsial *Fly ash* dengan Penambahan Serat *Polypropylene*

Fakhruddin, Fitria Ramadani Subhan, Herdwyal Harika

Civil Engineering, Hasanuddin University, Gowa

e-mail: fitriaramadanisubhan@gmail.com

fakhruddin@unhas.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan pembangunan infrastruktur mendorong meningkatnya kebutuhan beton, sementara produksi semen berkontribusi besar terhadap emisi CO₂ global. Untuk mengurangi dampak lingkungan, beton geopolimer dikembangkan sebagai alternatif ramah lingkungan dengan memanfaatkan abu ampas tebu (AAT) sebagai substitusi parsial *fly ash*. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi sifat mekanik beton geopolimer berbasis *fly ash* dengan variasi kadar AAT serta penambahan serat *polypropylene* (PP). Variasi AAT yang digunakan adalah 0%, 5%, dan 10% dari total binder dengan dosis serat PP 0,6 kg/m³ dengan benda uji berupa silinder berukuran tinggi 20 cm dan diameter 10 cm. Pengujian yang dilakukan meliputi slump test untuk menilai workability, uji kuat tekan, tarik belah, serta pengamatan pola retak. Hasil penelitian menunjukkan nilai slump menurun seiring meningkatnya kadar AAT, yang menandakan penurunan workability. Substitusi 10% AAT menghasilkan kuat tekan tertinggi dengan peningkatan sebesar 10,44% pada umur 7 hari dan 41,19% pada umur 28 hari, menunjukkan peningkatan kekuatan yang signifikan. Kuat tarik belah optimum diperoleh pada 5% AAT dengan peningkatan 12,63% (3 hari), 11,74% (7 hari), dan 29,10% (28 hari), sehingga memberikan kontribusi positif terhadap ketahanan tarik beton. Pola retak silinder pada 0% AAT didominasi retak geser, sedangkan pada 5% dan 10% AAT cenderung membentuk pola kolom yang lebih teratur. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa AAT efektif digunakan sebagai substitusi parsial *fly ash*, sedangkan serat PP berperan penting dalam meningkatkan kinerja mekanik dan mengurangi kerentanan retak.

Kata kunci: beton geopolimer, abu ampas tebu, *fly ash*, serat *polypropylene*, sifat mekanik

1. PENDAHULUAN

Peningkatan pembangunan infrastruktur dalam beberapa dekade terakhir seiring dengan urbanisasi dan industrialisasi telah mendorong peningkatan signifikan terhadap kebutuhan beton sebagai material konstruksi utama. Produksi semen, sebagai komponen penting dalam beton, merupakan salah satu sumber emisi karbon dioksida (CO₂) terbesar, berkontribusi sekitar 7% terhadap emisi global. Produksi semen pada tahun 2021 dilaporkan mencapai 4,4 miliar ton dan diproyeksikan konsumsi beton akan melampaui 18 miliar ton pada tahun 2050 (Rihan et al., 2024). Kondisi ini mendorong pengembangan material alternatif yang dapat mengurangi ketergantungan terhadap semen Portland. Salah satu alternatif adalah beton geopolimer, yang pertama kali diperkenalkan oleh Davidovits sebagai polimer anorganik berbasis alumino-silikat yang diaktivasi menggunakan larutan alkali (Manjunath et al., 2019). Material yang kaya akan silika dan alumina dan berpotensi dijadikan sebagai pengganti semen banyak ditemukan dari limbah hasil industri dan pertanian, diantaranya adalah abu ampas tebu, abu sekam padi, abu jerami gandum, abu tempurung kelapa, *fly ash*, dan slag (Goyal & Murmu, 2024).

Abu ampas tebu merupakan residu pembakaran ampas tebu dari industri gula yang kaya akan silika (55–82,68%) dan alumina (1,52–9,23%), sehingga berpotensi dapat membentuk reaksi geopolimerisasi (Goyal & Murmu, 2024). Beberapa penelitian melaporkan kinerja positif penggunaan abu ampas tebu sebagai substitusi parsial *fly ash* maupun slag. Rihan et al. (2024) melaporkan kuat tekan optimum sebesar 64 MPa pada variasi 5% abu ampas tebu, sementara Singh (2021) menemukan substitusi 10% abu ampas tebu menghasilkan sifat mekanik yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Studi oleh Tanu & Unnikrishnan (2023) menunjukkan bahwa meskipun substitusi abu ampas tebu menyebabkan sedikit penurunan kekuatan, nilai kuat tekan tetap memenuhi mutu rencana hingga kadar 20%. Vanathi et al. (2023) melaporkan kombinasi abu ampas tebu dan slag menghasilkan kuat tekan 54,4 MPa serta peningkatan sifat tarik dan lentur beton. Temuan Manjunath et al. (2019) juga mendukung bahwa penggunaan abu ampas tebu dosis rendah (5%) pada GGBS menghasilkan kekuatan maksimum dan struktur mikro yang lebih padat. Chuewangkam et al. (2022) menekankan bahwa meskipun kandungan kuarsa kristalin dalam abu ampas tebu kurang reaktif, pada variasi 10% abu ampas tebu diperoleh kuat tekan sebesar 45,7 MPa.

Meskipun demikian, beton geopolimer cenderung bersifat getas sehingga kurang mampu menahan energi sebelum

mengalami keruntuhan. Salah satu pendekatan untuk mengatasi kelemahan ini adalah dengan menambahkan serat *polypropylene*, yang terbukti efektif meningkatkan ketangguhan, membatasi propagasi retak, dan memperbaiki daktilitas beton (Arunkumar et al., 2020). Akbar et al. (2021) melaporkan penambahan 1% serat *polypropylene* meningkatkan kuat tarik belah mortar geopolimer sebesar 36%, sedangkan Gholampour et al. (2025) menemukan peningkatan kuat tekan hingga 77,2 MPa pada mortar geopolimer berbasis *fly ash* dan slag. Chuewangkam et al. (2022). Berdasarkan kajian tersebut, penelitian ini difokuskan untuk menganalisis sifat mekanik dan mikrostruktur beton geopolimer berbasis *fly ash* dengan substitusi parsial abu ampas tebu dan penambahan serat *polypropylene*, sebagai upaya menghasilkan material konstruksi yang lebih berkelanjutan.

2. LANDASAN TEORI

Beton Geopolimer

Beton geopolimer adalah inovasi material konstruksi yang memanfaatkan limbah industri seperti *fly ash*, slag, dan abu ampas tebu sebagai pengganti semen Portland, sehingga mampu menurunkan emisi CO₂ dan konsumsi energi. Diperkenalkan oleh Joseph Davidovits pada 1970-an, geopolimer terbentuk dari reaksi bahan kaya silika dan alumina dengan larutan alkali, menghasilkan struktur yang kuat, tahan suhu tinggi, dan tahan serangan kimia. Keunggulannya meliputi keberlanjutan, ketahanan lingkungan, serta biaya perawatan yang lebih rendah, menjadikannya solusi ramah lingkungan untuk beton pracetak, perbaikan beton lama, dan konstruksi berkelanjutan.

Abu Ampas Tebu

Abu ampas tebu merupakan produk residu dari industri pengolahan gula yang diperoleh setelah proses ekstraksi gula dari batang tebu. Abu ampas tebu berasal dari pembakaran ampas tebu, yaitu limbah berserat yang menyusun sekitar 30%–34% dari berat tebu segar yang baru dipanen. Ketika ampas tebu dibakar pada suhu tertentu di dalam ketel uap, akan dihasilkan abu sekitar 2%–3% dari massa ampas tebu. Abu ampas tebu sangat berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan pozzolan karena kandungan silikanya yang tinggi. Efektivitas pozzolan pada abu ampas tebu sangat bergantung pada komposisi kimianya, terutama keberadaan senyawa seperti SiO₂, Al₂O₃, dan Fe₂O₃. Abu ampas tebu dapat mengisi celah-celah kecil dalam beton, sehingga menciptakan struktur beton yang lebih rapat dan homogen.

Serat Polypropylene

Serat *polypropylene* (PP) merupakan salah satu jenis serat sintesis yang memiliki sifat yang unggul, yaitu ringan, tahan terhadap zat kimia, serta memiliki durabilitas yang baik sehingga cocok digunakan pada lingkungan yang agresif (Gholampour et al., 2025). Penambahan serat *polypropylene* pada beton geopolimer yang menggunakan *fly ash* dapat membantu menurunkan tingkat penyusutan, serta memperbaiki sifat rapuh dari material tersebut. Penggunaan serat *polypropylene* juga mampu memperlambat penyebaran retakan dan meningkatkan ketahanan beton geopolimer terhadap keretakan (Arunkumar et al., 2020).

Kuat Tekan

Kuat tekan adalah kemampuan material untuk menahan beban tekan hingga mengalami keruntuhan. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberikan beban aksial terhadap benda uji berbentuk silinder atau kubus hingga mencapai keruntuhan. SNI 2847:2019 menetapkan kuat tekan beton f'_c untuk silinder beton berumur 28 hari. Beton akan segera hancur ketika beban ultimit, dan retak yang searah dengan beban akan terlihat. Diketahui bahwa regangan kegagalan awal yang relatif linear akan meningkat seiring dengan meningkatnya kekuatan tekan beton, sedangkan daktilitas menurun seiring dengan kekuatan. Kuat tekan beton dapat dihitung dengan persamaan berikut:

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

dengan f'_c = kuat tekan (MPa), P = beban maksimum saat keruntuhan (N), A = luas penampang benda uji (mm²)

Kuat Tarik Belah

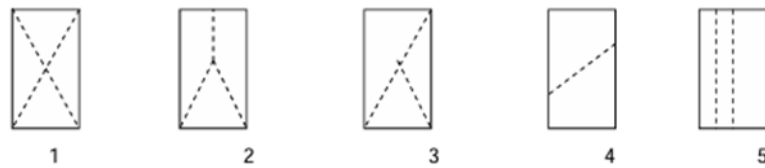
Kuat tarik belah adalah ukuran kemampuan beton untuk menahan gaya tarik tidak langsung yang bekerja secara diametral. Berdasarkan SNI 03-2491-2002, pengujian ini dilakukan dengan membebani silinder beton secara horizontal sampai terbelah. Beban ditempatkan di sepanjang diameter benda uji, sehingga membentuk tegangan tarik di bidang tengah benda uji tersebut. Kuat tarik belah biasanya sekitar 7–12% dari kuat tekan, tergantung pada jenis agregat, jenis semen, dan kualitas curing yang digunakan. Nilai kuat tarik belah dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi DL} \quad (2)$$

dengan: f_{ct} = kuat tarik belah (MPa), P = beban maksimum (N), D = diameter benda uji (mm), L = panjang benda uji (mm)

Pola Retak

Pengujian kuat tekan pada beton umumnya menggunakan benda uji berbentuk silinder atau kubus. Berdasarkan SNI 1974:2011, pengujian kuat tekan dilakukan dengan memberi beban aksial pada beton hingga mencapai kehancuran. Beton akan mengalami tegangan tekan dan ekspansi lateral kerana efek Poisson. Ekspansi lateral yang terjadi akan menyebabkan tegangan tarik transversal yang memicu terjadinya retak pada beton. Pola retak pada beton terbagi menjadi lima diantaranya: 1. kehancuran kerucut; 2. kehancuran kerucut dan belah; 3. kehancuran kerucut geser; 4. kehancuran geser; 5. kehancuran sejajar sumbu tegak (columnar).



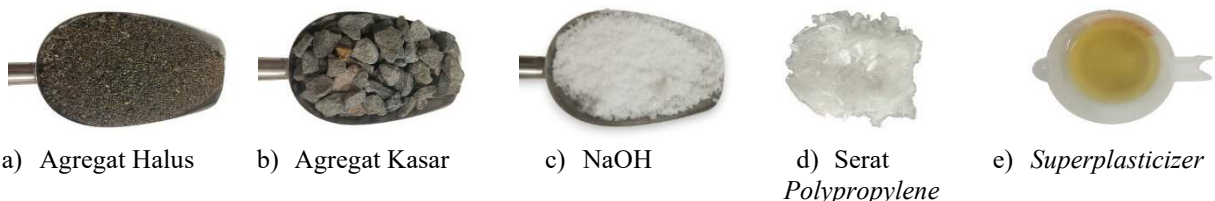
Gambar 1. Pola Retak pada Silinder

3. METODOLOGI PENELITIAN

Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *fly ash*, abu ampas tebu (AAT), agregat halus, agregat kasar, larutan aktivator (NaOH dan Na_2SiO_3), serat *polypropylene* (PP), superplasticizer, serta retarder dan boraks seperti ditampilkan pada Gambar 1. *Fly ash* diperoleh dari PLTU Jeneponto milik PT. Bosowa Energi dan berfungsi sebagai bahan pengikat utama. Abu ampas tebu digunakan sebagai substitusi parsial terhadap *fly ash* dan diperoleh dari hasil pembakaran limbah ampas tebu Pabrik Gula Camming yang telah melalui proses pembakaran sehingga memiliki kandungan silika yang cukup tinggi untuk reaksi geopolimerisasi. Komposisi kimia *fly ash* dan abu ampas tebu dianalisis menggunakan X-ray fluorescence (XRF) dan hasilnya memenuhi ketentuan ASTM C618 sehingga *fly ash* diklasifikasikan sebagai pozzolan kelas C sedangkan abu ampas tebu termasuk dalam kelas F. Hasil uji XRF *fly ash* dan abu ampas tebu ditampilkan pada Tabel 1. Agregat halus yang digunakan adalah pasir alami dengan ukuran maksimum 4,75 mm, sedangkan agregat kasar berupa batu pecah dengan ukuran nominal 10–20 mm. Kedua jenis agregat diuji terlebih dahulu untuk memastikan kesesuaiannya dengan standar kualitas, menggunakan metode pengujian yang mengacu pada ASTM dan SNI.

Larutan aktivator yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas campuran Sodium Hidroksida (NaOH) 10 M dan Sodium Silikat (Na_2SiO_3). Larutan NaOH disiapkan dengan melarutkan NaOH ke dalam air, kemudian diaduk hingga homogen. Proses persiapan dilakukan minimal 24 jam sebelum pencampuran untuk memastikan suhu larutan stabil. Sebagai contoh, larutan NaOH 10 M diperoleh dengan melarutkan 400 g NaOH dalam 1 liter air hingga larut sempurna. Selanjutnya, larutan aktivator lengkap dibuat dengan mencampurkan sodium silikat ke dalam larutan NaOH sekitar satu jam sebelum proses pencampuran beton geopolimer dilakukan. Serat *polypropylene* yang digunakan diperoleh dari Sika Fiber dengan panjang 12 mm dan modulus elastisitas 6000–9000 MPa. Dosis serat yang digunakan adalah 0,6 kg/m³. Bahan tambah berupa superplasticizer yang digunakan untuk meningkatkan workability campuran, sedangkan retarder dan boraks digunakan untuk mengatur waktu ikat (setting time) beton geopolimer sehingga memudahkan proses pengecoran dan pematatan.





Gambar 2. Material Penyusun Beton Geopolimer

Tabel 18. Hasil Uji XRF Fly ash dan Abu Ampas Tebu

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
<i>Fly ash</i>	26,16	30,72	16,27	8,74
Abu Ampas Tebu	2,00	51,33	29,63	11,33

Komposisi campuran

Pada penelitian ini, beton geopolimer direncanakan dengan mutu $f'c > 25$ MPa pada umur 28 hari. Variasi substitusi abu ampas tebu (AAT) adalah 0%, 5%, dan 10% dari total binder, dengan penambahan serat *polypropylene* 0,6 kg/m³. Larutan aktivator menggunakan kombinasi Na₂SiO₃ : NaOH = 1,5 dengan konsentrasi NaOH 10 M dan rasio aktivator terhadap binder 0,5. Selain itu, ditambahkan superplasticizer 1,5%, retarder 0,3%, dan boraks 1,5%, seluruhnya dihitung terhadap berat total binder, untuk meningkatkan workability dan mengatur waktu ikat campuran. Desain campuran ditentukan berdasarkan hasil trial mix sebelumnya. Benda uji diberi kode GN (kontrol, 0% AAT), GA (5% AAT), dan GB (10% AAT). Pemilihan variasi 5% dan 10% didasarkan pada penelitian terdahulu yang menunjukkan rentang tersebut mampu menghasilkan kinerja mekanik yang baik. Rancangan mix design ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 19. Mix Design Beton Geopolimer

Material	Kode Variasi		
	GN	GA	GB
	(AAT 0%)	(AAT 5%)	(AAT 10%)
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Agregat Halus	700	700	700
Agregat Kasar	1000	1000	1000
<i>Fly ash</i>	500	475	450
Abu Ampas Tebu (AAT)	0	25	50
NaOH	100	100	100
Na ₂ SiO ₃	150	150	150
Serat <i>Polypropylene</i>	0,60	0,60	0,60
<i>Superplasticizer</i>	7,50	7,50	7,50
Boraks	7,50	7,50	7,50
Retarder	1,50	1,50	1,50

Metode Pengecoran dan Perawatan

Metode pembuatan benda uji diawali dengan menyiapkan APD, alat uji (slump test , concrete mixer yang telah dibasahi), serta memastikan agregat halus dan kasar berada dalam kondisi SSD. Semua material berupa *fly ash*, abu ampas tebu, agregat, serat *polypropylene*, superplasticizer, retarder, dan boraks ditimbang sesuai komposisi campuran. Larutan aktivator NaOH 10 M dan Na₂SiO₃ dicampur terlebih dahulu hingga homogen minimal 24 jam sebelum digunakan. Agregat halus, agregat kasar, *fly ash*, dan AAT dimasukkan ke dalam mixer selama 30 detik, lalu diaduk

manual selama 30 detik. Larutan aktivator beserta superplasticizer, boraks, dan retarder dituangkan, kemudian mixer dijalankan kembali selama 30 detik, dihentikan, dan diaduk manual selama 30 detik untuk memastikan campuran homogen. Mixer dinyalakan lagi selama 30 detik sambil menambahkan serat *polypropylene*. Setelah adukan homogen, sebagian adukan diuji slump flow, kemudian sisa adukan dituang ke cetakan silinder dan balok hingga penuh, dipadatkan dengan vibrator selama ± 15 detik, dan diratakan permukaannya. Cetakan ditutup dan dibiarkan selama 24 jam sebelum dibongkar. Benda uji selanjutnya dirawat dengan curing udara hingga umur pengujian 3, 7, dan 28 hari. Metode pengecoran dapat dilihat pada Gambar 3.



a) Persiapan material



b) Pencampuran NaOH dan Na₂SiO₃



c) Persiapan alat



d) Pencampuran material



e) Pengadukan dengan mixer



f) Pengadukan manual



g) Menuang aktivator dan bahan tambah



h) Pencampuran serat PP



i) Uji *slump flow*



j) Menuang campuran ke cetakan



k) Pemadatan dengan vibrator

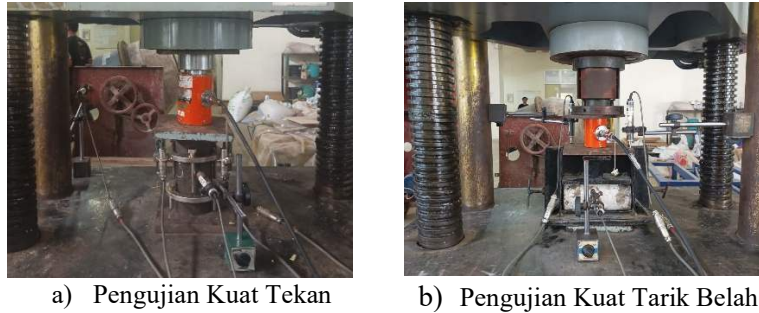


l) Menutup beton yang telah dipadatkan

Gambar 3. Tahapan Pembuatan Beton Geopolimer

Metode Pengujian

Pengujian beton pada penelitian ini meliputi uji slump flow, kuat tekan, dan kuat tarik belah. Uji slump flow dilakukan sesuai SNI 1972:2008 dan ACI 1611M-05 untuk menilai konsistensi dan kemudahan pengerjaan beton, dengan target penyebaran 50–75 cm. Beton segar dituangkan ke cetakan kerucut tanpa dipadatkan, cetakan dilepas vertikal, kemudian diameter penyebaran diukur dua arah dan dirata-ratakan. Uji kuat tekan dilakukan pada benda uji silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm menggunakan Universal Testing Machine (UTM) berkapasitas 1000 kN, dengan mengambil hasil rata-rata dari tiga sampel pada umur 3, 7, dan 28 hari. Uji kuat tarik belah menggunakan prosedur serupa pada benda uji silinder dengan pembebanan aksial horizontal, divalidasi dengan load cell kapasitas 200 kN, dan hasilnya dirata-ratakan dari tiga sampel pada umur 3, 7, dan 28 hari. Adapun metode pengujian kuat tekan dan tarik belah dapat dilihat pada Gambar 4.

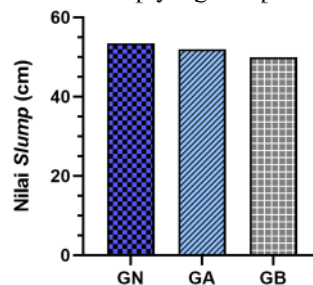


Gambar 4. Pengujian Sifat Mekanik Beton

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Slump Beton Geopolimer

Pengujian slump dilakukan untuk mengetahui tingkat kelecakan (workability) pada masing-masing campuran beton dengan variasi penambahan abu ampas tebu. Nilai slump yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 5.

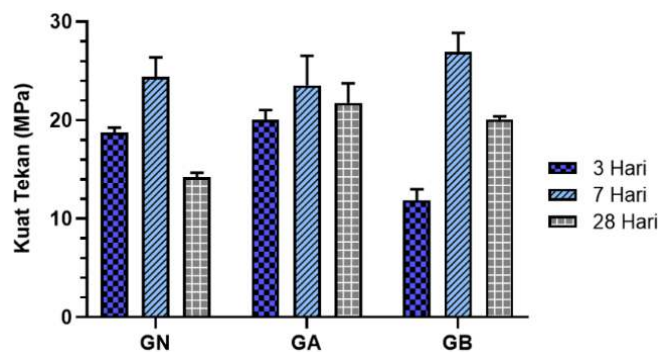


Gambar 5. Nilai Slump Setiap Variasi Abu Ampas Tebu

Berdasarkan Gambar 5 nilai slump beton geopolimer mengalami penurunan seiring peningkatan kadar abu ampas tebu, yaitu 54 cm pada variasi 0%, 52 cm pada variasi 5%, dan 50 cm pada variasi 10%, yang menunjukkan berkurangnya workability campuran beton seiring peningkatan persentase substitusi abu ampas tebu (AAT). Hal ini disebabkan oleh sifat AAT yang higroskopis, berpartikel tidak beraturan, dan berpori sehingga meningkatkan kebutuhan air. Meskipun demikian, ketiga variasi masih berada pada rentang 50–75 cm sehingga memenuhi spesifikasi ACI 1611M-05. Hasil ini sejalan dengan penelitian Abdalla et al. (2024) yang melaporkan peningkatan kebutuhan air akibat berat jenis AAT yang rendah serta karakteristik permukaannya, dan Rihan et al. (2024a) yang menunjukkan penurunan slump 2,70–24,30% pada variasi 5–20% akibat permukaan AAT yang berserat dan berpori sesuai pengamatan SEM.

Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan dengan tujuan untuk mengevaluasi sejauh mana kemampuan beton geopolimer dalam menahan beban tekan, terkhusus dengan adanya abu ampas tebu (AAT) sebagai substitusi parsial dari *fly ash*. Hasil pengujian beton geopolimer dengan variasi substitusi abu ampas tebu sebesar 0%, 5%, dan 10% pada umur 3, 7, dan 28 hari dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Nilai Rata-rata Kuat Tekan Beton

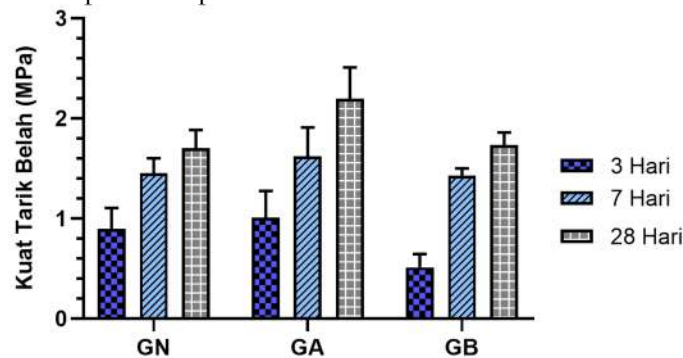
Hasil uji kuat tekan berdasarkan Gambar 6 menunjukkan bahwa hasil uji kuat tekan dari beton geopolimer variasi 0% (GN), 5% (GA), dan 10% (GB) substitusi abu ampas tebu terhadap total binder. Kuat tekan rata-rata yang diperoleh pada variasi 0%, 5%, dan 10% di umur 3 hari yaitu 18,7; 20,2; dan 11,9 MPa. Untuk kuat tekan rata-rata pada umur 7 hari diperoleh 24,4; 23,5, dan 26,9 MPa dan pada umur 28 hari didapatkan kuat tekan rata-rata yaitu 14,2; 21,8; dan 20,1 MPa. Berdasarkan data tersebut didapatkan bahwa terjadi peningkatan kuat tekan yang signifikan pada variasi 10% abu ampas tebu pada umur 7 dan 28 hari sebesar 10,44% dan 41,19% terhadap variasi 0%. Kuat tekan mengalami peningkatan progresif dari umur 3 ke 7 hari, namun setelah umur 28 hari terjadi penurunan kuat tekan. Meskipun kuat tekan beton yang diperoleh hanya sekitar 20 MPa pada umur 28 hari, nilai tersebut masih memenuhi syarat minimum sebagai beton struktural sesuai SNI 2847:2019, yang menetapkan batas minimal kuat tekan sebesar 17 MPa untuk beton non-prategang. Oleh karena itu, beton ini tetap dapat digunakan untuk elemen struktural ringan atau bangunan bertingkat rendah.

Penurunan kuat tekan pada umur 28 hari disebabkan oleh rendahnya rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ pada larutan aktivator. Kuat tekan beton dipengaruhi oleh rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ dalam larutan aktivator. Pada penelitian ini, rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ yang digunakan yaitu 0,49 dengan menganggap bahwa Na_2SiO_3 mengandung 14,98% Na_2O , 32,85% SiO_2 dan 52,17% H_2O serta menggunakan NaOH dengan kemurnian 97%. Adapun berdasarkan penelitian oleh França et al. (2023), kuat tekan optimum diperoleh pada campuran pasta geopolimer berbasis abu ampas tebu dengan rasio $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ yaitu 1,0, sedangkan rasio yang terlalu rendah yaitu antara 0,31-0,72 menghasilkan kuat tekan yang rendah. Rasio yang rendah ini mengakibatkan kelebihan alkali (Na^+) dari Na_2O yang tidak bereaksi membentuk alkali bebas. Alkali bebas dapat menyebabkan efloresensi dengan naiknya alkali bebas ke permukaan beton dan bereaksi dengan CO_2 di udara sehingga membentuk senyawa garam alkali yang berbentuk endapan putih. Efloresensi menyebabkan peningkatan porositas dan reaksi geopolimerisasi menjadi tidak maksimal karena kehilangan alkali aktif, serta menyebabkan mikroretak pada beton akibat terganggunya proses pembentukan gel pengikat C-A-S-H.

Hasil kuat tekan yang diperoleh pada penelitian ini berkontradiksi dengan temuan oleh Rihan et al. (2024b), dimana kuat tekan beton geopolimer dengan substitusi abu ampas tebu sebesar 0%, 5%, dan 10% menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya umur beton dan mencapai kuat tekan maksimum sebesar 64 MPa pada umur 28 hari untuk variasi substitusi 5% abu ampas tebu.

Kuat Tarik Belah

Pengujian kuat tarik belah dilakukan pada beton dengan variasi 0%, 5%, dan 10% abu ampas tebu dan diuji pada umur 3, 7, dan 28 hari untuk mengevaluasi pengaruh penambahan abu ampas tebu terhadap kekuatan tarik belah beton. Hasil pengujian yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Nilai Rata-rata Kuat Tarik Belah Beton

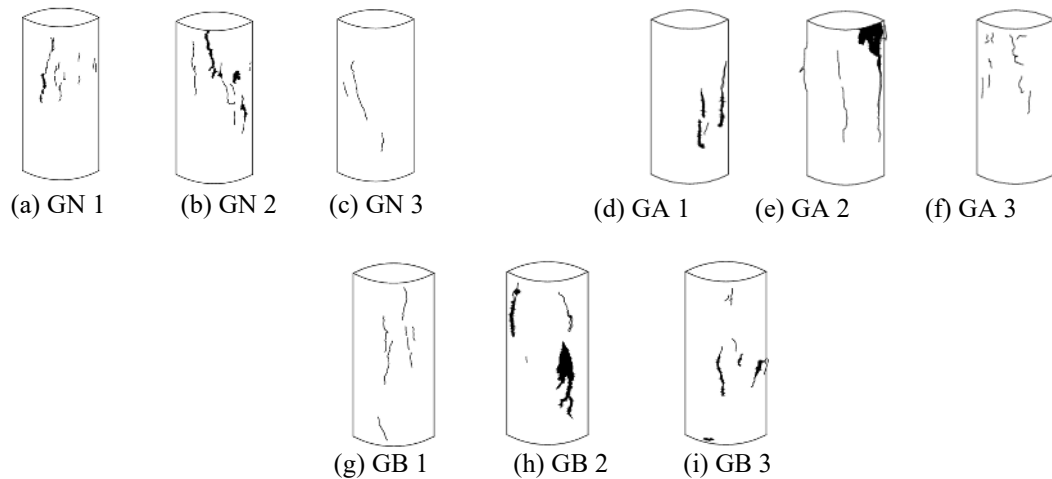
Gambar 7 menunjukkan hasil uji kuat tarik belah beton geopolimer variasi 0% (GN), 5% (GA), dan 10% (GB) substitusi abu ampas tebu. Hasil uji kuat tarik belah untuk variasi 0%, 5%, dan 10% pada umur 3 hari diperoleh sebesar 0,9; 1,0; dan 0,5 MPa. Untuk umur 7 hari didapatkan hasil yaitu 1,5; 1,6; dan 1,4 MPa, serta pada umur 28 hari mencapai 1,7; 2,2; dan 1,7 MPa. Variasi 5% abu ampas tebu menunjukkan kuat tarik belah tertinggi dibandingkan dengan variasi 0%. Kuat tarik belah variasi 5% mengalami peningkatan pada umur 3, 7, dan 28 hari sebesar 12,63%; 11,74%; dan 29,10% terhadap variasi 0%. Peningkatan ini menunjukkan hasil yang berbeda dengan hasil kuat tekan yang mengalami penurunan pada umur 28 hari. Kenaikan kuat tarik belah seiring bertambahnya umur beton disebabkan oleh adanya serat *polypropylene* yang membentuk “*fiber bridging*” di sepanjang retakan yang mulai terbuka.

Penelitian sebelumnya oleh Rihan et al. (2024b) menunjukkan hasil yang serupa ketika melakukan substitusi abu ampas tebu terhadap *fly ash* dengan variasi 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%, dimana terjadi penurunan kuat tarik belah seiring

bertambahnya substitusi abu ampas tebu akibat adanya porositas yang tinggi, ukuran partikel yang besar, dan density beton yang rendah.

Pola Retak

Retak yang terjadi pada benda uji silinder pada saat dilakukan pengujian kuat tekan memberikan gambaran mengenai mode kegagalan yang terjadi pada beton geopolimer. Dari hasil pengamatan visual didapatkan pola retakan yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Pola retak silinder beton geopolimer variasi GN (0%), GA (5%), dan GB (10%).

Hasil analisis pola retak menunjukkan bahwa beton geopolimer tanpa AAT (0%) didominasi pola kehancuran geser pada semua umur, sedangkan variasi 5% AAT menampilkan dominasi pola kolumnar terutama pada umur 7 dan 28 hari, dengan beberapa kombinasi kerucut dan belah. Pada variasi 10% AAT, pola retak semakin konsisten berbentuk kolumnar pada umur 7 dan 28 hari, meskipun pada umur 3 hari masih ditemukan variasi geser dan kerucut-belahan. Secara keseluruhan, penambahan AAT cenderung mengubah pola retak dari dominasi geser menjadi kolumnar, yang mengindikasikan keruntuhan yang lebih terkontrol dan daktil.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil uji mekanis beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan substitusi parsial abu ampas tebu dan penambahan serat *polypropylene* didapatkan bahwa substitusi abu ampas tebu sebesar 10% menghasilkan kuat tekan optimum dengan peningkatan 10,44% (7 hari) dan 41,19% (28 hari) dibanding variasi 0%, meskipun sedikit menurun setelah 28 hari. Sementara itu, kuat tarik belah optimum dicapai pada substitusi 5% abu ampas tebu, dengan peningkatan sebesar 12,63% (3 hari), 11,74% (7 hari), dan 29,10% (28 hari) dibandingkan variasi 0% dan dipengaruhi mekanisme fiber bridging serat *polypropylene* yang menahan propagasi retak. Adapun perubahan pola retak dari geser menjadi kolumnar menunjukkan keruntuhan yang lebih daktil. Dengan demikian, substitusi 5–10% abu ampas tebu dengan serat *polypropylene* meningkatkan kinerja mekanik dan memperbaiki perilaku keruntuhan beton geopolimer

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM C618 – 19. 2019. “Standard Specification for Coal *Fly ash* and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.” United States: ASTM International.
- Abdalla, T. A., Hussein, A. A. E., Ahmed, Y. H., & Semmana, O. (2024). Strength, durability, and microstructure properties of concrete containing bagasse ash – A review of 15 years of perspectives, progress and future insights. *Results in Engineering*, 21, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.101764>

- Akbar, A., Farooq, F., Shafique, M., Aslam, F., Alyousef, R., & Alabduljabbar, H. (2021). Sugarcane bagasse ash-based engineered geopolymer mortar incorporating propylene fibers. *Journal of Building Engineering*, 33, 101492. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101492>
- Arunkumar, K., Muthukannan, M., Dinesh Babu, A., Hariharan, A. L., & Muthuramalingam, T. (2020). Effect on addition of *Polypropylene* fibers in wood ash-fly ash based geopolymer concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872(1), 012162. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/872/1/012162>
- Chuewangkam, N., Nachaithong, T., Chanlek, N., Thongbai, P., & Pinitsoontorn, S. (2022). Mechanical and Dielectric Properties of *Fly ash* Geopolymer/Sugarcane Bagasse Ash Composites. *Polymers*, 14(6), 1140. <https://doi.org/10.3390/polym14061140>
- França, S., Fernandes Figueiredo, P., Nóbrega Sousa, L., Vinicio De Moura Solar Silva, M., Henrique Ribeiro Borges, P., & Cesar Da Silva Bezerra, A. (2023). Reaction mechanisms in geopolymers produced from sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 377, 131124. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131124>
- Gholampour, A., Hosseini-Poul, S.-A., MohammadNezhad, S., Nematzadeh, M., & Ozbakkaloglu, T. (2025). Effect of *polypropylene* and polyvinyl alcohol fibers on mechanical behavior and durability of geopolymers containing lead slag: Testing, optimization, and life cycle assessment. *Construction and Building Materials*, 462, 139960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.139960>
- Goyal, P. K., & Murmu, M. (2024). A review of sugarcane bagasse ash: Characteristics, properties and sustainable applications in concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1409(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1409/1/012002>
- Manjunath, Dr. Y. M., T M, S., Professor in Department of Civil Engineering, National Institute of Engineering (NIE), Mysore, Karnataka, 570008, India., Srinivas, D., & Assistant Manager in L & T CTEA, Mysore, Karnataka, India. (2019). Mechanical and Microstructural Properties of Bagasse Ash based Geopolymer Concrete. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(9), 2654–2461. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I7830.078919>
- Rihan, M. A. M., Alahmari, T. S., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024). Impact of Alkaline Concentration on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Made up of *Fly ash* and Sugarcane Bagasse Ash. *Sustainability*, 16(7), 2841. <https://doi.org/10.3390/su16072841>
- Rihan, M. A. M., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024a). Effect of sugarcane bagasse ash addition and curing temperature on the mechanical properties and microstructure of *fly ash*-based geopolymer concrete. *Open Ceramics*, 19, 100616. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100616>
- Rihan, M. A. M., Onchiri, R. O., Gathimba, N., & Sabuni, B. (2024b). Mechanical and Microstructural Properties of Geopolymer Concrete Containing *Fly ash* and Sugarcane Bagasse Ash. *Civil Engineering Journal*, 10(4), 1292–1309. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-04-018>
- SNI 1972:2008. 2008. “Metode Pengujian Kuat Tekan Beton.” Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1974:2011. 2011. “Tata Cara Pengujian Kuat Tarik Belah Beton.” Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2847:2019. 2019. “Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.” Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Singh, K. (2021). Experimental study on metakolin and bagasse ash based geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*, 37, 3289–3295. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.116>
- Tanu, H. M., & Unnikrishnan, S. (2023). Mechanical Strength and Microstructure of GGBS-SCBA based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 7816–7831. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.051>
- Vanathi, V., Nagarajan, V., & Jagadesh, P. (2023). Influence of sugarcane bagasse ash on mechanical properties of geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 79, 107836. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107836>