

Pemanfaatan Material Marginal Binder pada Beton dengan Substitusi 45% GGBFS dan Serat Polypropylene: Analisis Tegangan-Regangan dan Pola Retak

Muhammad Irfan Nurdin*, Mardiana Oesman
Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung
* muhamad.irfan.nurdin@polban.ac.id

Diajukan : 01 Januari 2024, Revisi : 01 Januari 2024, Diterima : 01 Januari 2024

Abstract

Utilization of industrial by-products such as Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) in concrete is a strategy to reduce carbon footprint. However, materials often do not meet standard specifications (Marginal Binder), such as specific gravity requirements. This study aims to analyze the mechanical behavior of concrete using marginal binder materials with 45% GGBFS substitution and the addition of 7 kg/m³ Polypropylene (PP) fibers. The method used was experimental with cylindrical specimens of 100x200 mm. Testing included compressive strength, stress-strain relationship analysis, and observation of failure patterns. The results showed that despite using marginal binders (Cement SG 2.93; GGBFS SG 2.84), the concrete achieved normal compressive strength. The combination of 45% GGBFS and 7 kg/m³ PP fiber increased compressive strength by 32.2% compared to normal concrete. The stress-strain analysis indicated that the addition of fibers significantly improved ductility, characterized by a broader post-peak curve area. The crack pattern shifted from brittle failure in normal concrete to a more ductile failure with controlled micro-cracks in fiber-reinforced concrete. This proves that Marginal Binder materials can be engineered to produce normal-performance concrete.

Keywords: crack pattern, GGBFS, polypropylene fiber, stress-strain, Marginal Binder binder

Abstrak

Pemanfaatan limbah industri seperti *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS) dalam beton merupakan strategi pengurangan jejak karbon. Namun, seringkali material yang tersedia tidak memenuhi spesifikasi standar (*marginal binder*), seperti syarat berat jenis. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku mekanis beton yang menggunakan material binder Marginal Binder dengan substitusi 45% GGBFS dan penambahan serat Polypropylene (PP) 7 kg/m³. Metode yang digunakan adalah eksperimental dengan benda uji silinder 100x200 mm. Pengujian meliputi kuat tekan, analisis hubungan tegangan-regangan, dan pengamatan pola keruntuhan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun menggunakan *marginal binder* (BJ Semen 2,93; BJ GGBFS 2,84), beton mampu mencapai kuat tekan beton normal. Kombinasi GGBFS 45% dan serat PP 7 kg/m³ meningkatkan kuat tekan sebesar 32,2% dibandingkan beton normal. Analisis tegangan-regangan menunjukkan penambahan serat secara signifikan meningkatkan daktilitas beton, ditandai dengan area kurva *post-peak* yang lebih luas. Pola retak berubah dari keruntuhan getas pada beton normal menjadi lebih daktil dengan retak mikro yang terkontrol pada beton serat. Hal ini membuktikan material Marginal Binder dapat direkayasa menghasilkan beton berkinerja normal.

Kata Kunci: Marginal binder, GGBFS, pola retak, serat polypropylene, tegangan-regangan

1. PENDAHULUAN

Industri konstruksi global saat ini menghadapi tantangan ganda yang mendesak, yaitu kebutuhan akan material infrastruktur yang berkinerja baik serta tuntutan untuk mengurangi dampak lingkungan (Dräger & Letmathe, 2022; Jasim et al., 2023; Lima et al., 2021; Sandanayake, 2022). Semen Portland, sebagai bahan pengikat utama dalam beton, diketahui berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca. Produksi satu ton semen diperkirakan menghasilkan emisi karbon dioksida CO² sekitar 0,930 ton, yang menyumbang porsi besar terhadap total emisi karbon global (Andrew, 2019; Cheng et al., 2023; Guo et al., 2024). Oleh karena itu, inovasi menuju *green concrete* atau beton ramah lingkungan melalui pemanfaatan *Supplementary Cementitious Materials* (SCM) menjadi strategi krusial untuk keberlanjutan infrastruktur (Al-Mansour et al., 2019; Kumar et al., 2022).

Salah satu material SCM yang potensial adalah *Ground Granulated Blast Furnace Slag* (GGBFS), yang merupakan limbah B3 dari industri baja. Pemanfaatan GGBFS tidak hanya mengurangi limbah industri, tetapi juga menawarkan jejak karbon yang jauh lebih rendah, yakni sekitar 0,052–0,143 ton CO² per ton material, dibandingkan dengan klinker semen. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa substitusi semen dengan GGBFS dapat memperbaiki sifat durabilitas dan mekanis beton jangka panjang (Murthy & Patil, 2022; Omer et al., 2025; Prasanna et al., 2021).

Namun, permasalahan teknis sering ditemukan di lapangan terkait kualitas material penyusun yang tidak selalu memenuhi spesifikasi standar. Dalam studi kasus material lokal yang digunakan pada penelitian ini, ditemukan bahwa berat jenis (*density*) material binder berada di bawah persyaratan standar SNI 2531:2015. Semen Portland Komposit yang digunakan memiliki berat jenis 2,93 gr/cm³ (syarat minimum 3,00 gr/cm³), dan GGBFS memiliki berat jenis 2,84 gr/cm³ (syarat minimum 2,88 gr/cm³). Material dengan karakteristik *marginal binder* seperti ini seringkali dianggap tidak layak untuk aplikasi struktural, sehingga potensinya sering terabaikan.

Selain tantangan pada kualitas binder, beton secara alami memiliki kelemahan berupa sifat getas (*brittle*) dan ketahanan tarik yang rendah (Ahmad et al., 2022; Hosseinzadeh et al., 2023; Li et al., 2016). Substitusi semen dalam volume tinggi (*high volume*) dengan material pozzolan seperti GGBFS terkadang dapat memperlambat setting time dan mempengaruhi kuat tekan awal. Untuk mengatasi kelemahan ini, penambahan serat sintetis seperti Polypropylene (PP) menjadi solusi efektif. Serat PP berfungsi sebagai tulangan mikro yang dapat menahan regangan tarik, mencegah perambatan retak mikro (*micro-cracks*), serta meningkatkan daktilitas dan ketahanan pasca-retak (*post-crack behaviour*) beton (Farhan et al., 2023; Murthy & Patil, 2022; Thakur et al., 2022).

Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan antara penggunaan material *marginal binder* dengan kebutuhan beton berkinerja tinggi. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi perilaku mekanis beton yang menggunakan substitusi 45% GGBFS dari total binder, dikombinasikan dengan serat PP. Analisis dilakukan secara mendalam terhadap kurva hubungan tegangan-regangan (*stress-strain relationship*) dan pola keruntuhan (*failure pattern*) untuk membuktikan bahwa dengan rekayasa material yang tepat, material *marginal binder* tetap dapat menghasilkan beton dengan mutu dan daktilitas yang unggul.

Pemanfaatan GGBFS sebagai material substitusi semen telah diakui secara global mampu mereduksi jejak karbon dan meningkatkan durabilitas beton (Hamad et al., 2021; Lai et al., 2022; Liu et al., 2024). Namun, mayoritas literatur saat ini hanya berfokus pada penggunaan material berspesifikasi ideal. Di lapangan, kualitas material penyusun seringkali bersifat marjinal (*non-konvensional*). Sebagai studi kasus, material *binder* lokal yang digunakan dalam penelitian ini memiliki berat jenis di bawah standar; di mana Semen Portland Komposit hanya mencapai 2,93 gr/cm³ (syarat 3,00 gr/cm³) dan GGBFS sebesar

2,84 gr/cm³ (syarat 2,88 gr/cm³), sehingga penggunaan material ini menjadi *research gap* yang belum banyak dieksplorasi secara memadai.

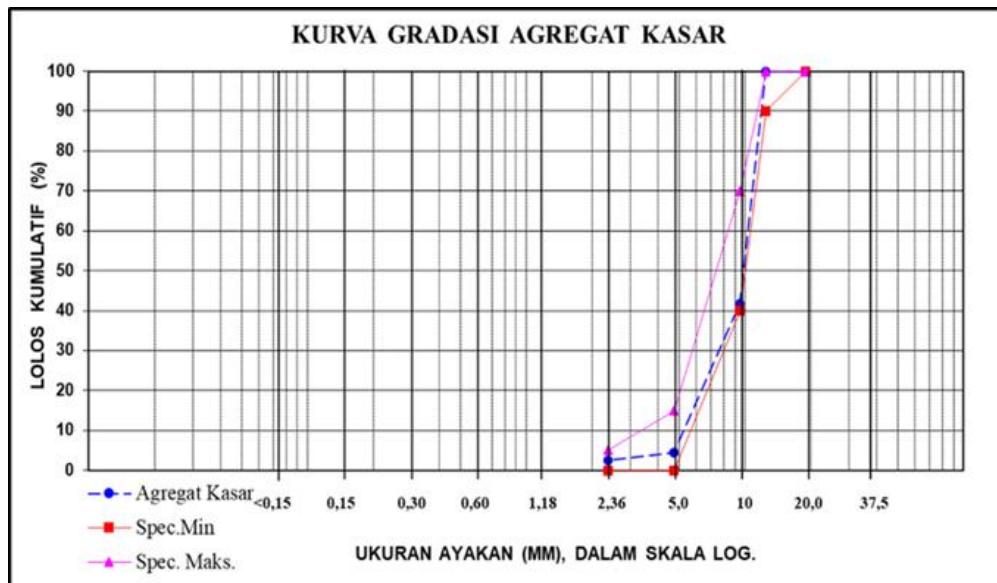
Penggunaan *binder* marjinal—terutama dengan volume substitusi GGBFS yang tinggi (45%)—memiliki tantangan teknis berupa potensi penurunan kekuatan awal dan memburuknya sifat getas (*brittle*) bawaan beton (Li et al., 2016).. Untuk merekayasa kelemahan material lokal tersebut, penelitian ini memperkenalkan penambahan serat sintetik PP sebagai kompensator mekanis. Serat PP didesain untuk berfungsi sebagai tulangan mikro yang menjembatani retak internal (*crack-bridging*), menahan regangan tarik, serta mengembalikan daktilitas beton (Farhan et al., 2023; Thakur et al., 2022).

Berangkat dari kesenjangan tersebut, penelitian ini menawarkan kebaruan (*novelty*) dengan mengevaluasi secara komprehensif kelayakan struktural dari material *marginal binder* lokal. Fokus utama studi ini adalah menganalisis interaksi mekanis dari substitusi 45% GGBFS marjinal yang dikombinasikan dengan serat PP. Pengujian difokuskan pada kurva hubungan tegangan-regangan dan mode keruntuhan untuk membuktikan bahwa melalui rekayasa serat yang tepat, defisiensi material lokal non-konvensional dapat diatasi untuk menghasilkan beton struktural yang memiliki daktilitas dan kapasitas serapan energi (*toughness*) yang tinggi.

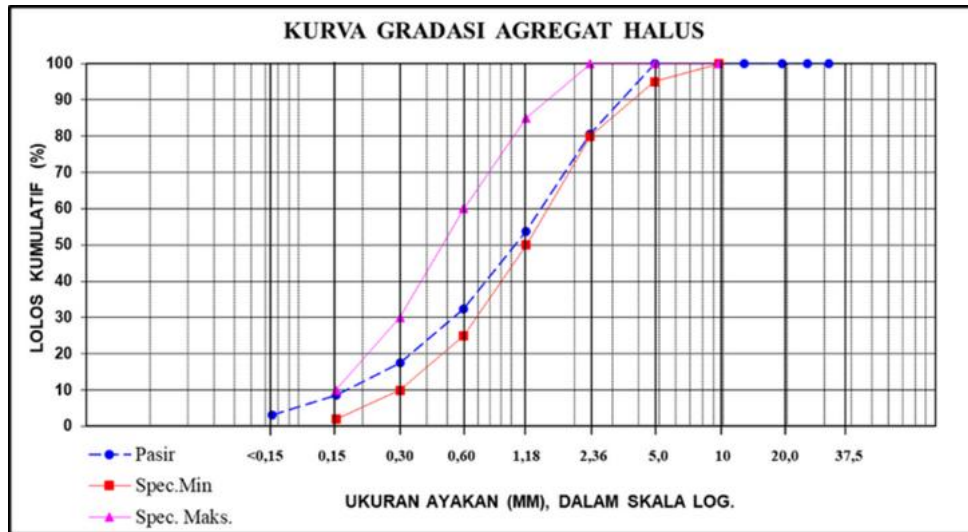
2. METODE PENELITIAN

Material Penelitian Material *binder* yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari Semen Portland Komposit (PCC) dan GGBFS. Berdasarkan pengujian fisik yang mengacu pada SNI 2531:2015, kedua material ini memiliki berat jenis di bawah spesifikasi minimum yang disyaratkan. Semen memiliki berat jenis 2,93 gr/cm³ (syarat min. 3,00 gr/cm³) dan GGBFS memiliki berat jenis 2,84 gr/cm³ (syarat min. 2,88 gr/cm³). Kondisi ini menempatkan material tersebut dalam kategori binder marginal atau *marginal binder*.

Agregat kasar yang digunakan adalah batu pecah dengan ukuran maksimum 12,5 mm, sedangkan agregat halus memiliki ukuran maksimum 4,75 mm. Kedua agregat telah melalui proses pencucian (*washing*) untuk mengurangi kadar lumpur yang awalnya tinggi (1,39% pada agregat kasar dan 5,87% pada agregat halus) agar memenuhi standar ASTM C33. Adapun kurva analisa ayak yang diperoleh adalah seperti yang terlihat pada **Gambar 1**.



(a)



(b)

Gambar 1 (a) Kurva Gradasi Agregat Kasar dan (b) Kurva Gradasi Agregat Halus.

Serat yang digunakan sebagai bahan perkuatan adalah serat PP jenis makro monofilamen. Bahan tambah kimia (*admixture*) berupa Superplasticizer digunakan untuk menjaga kelecakan beton dengan faktor air semen yang rendah.

Perancangan Campuran (Mix Design) Perancangan komposisi campuran beton mengacu pada metode ACI 211.1-1991 dengan target kuat tekan rencana untuk *normal strength concrete*. Rasio air terhadap binder (*w/b ratio*) ditetapkan konstan sebesar 0,40 untuk seluruh variasi campuran guna meminimalisir pengaruh air terhadap kuat tekan.

Penelitian ini membandingkan tiga jenis campuran:

- Beton Normal (BN): Menggunakan 100% semen PCC tanpa substitusi (540 kg/m³).
- Beton GGBFS 45%: Semen disubstitusi sebesar 45% beratnya dengan GGBFS. Komposisi binder terdiri dari 297 kg/m³ semen dan 243 kg/m³ GGBFS.
- Beton GGBFS 45% + Serat PP: Menggunakan komposisi binder yang sama dengan variasi kedua, ditambah dengan serat Polypropylene sebanyak 7 kg/m³.

Prosedur Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Proses pencampuran dilakukan menggunakan mesin pengaduk *Hobart Blakeslee* berkapasitas 0,012 m³ untuk menjamin homogenitas campuran. Tahapan pencampuran diatur sebagai berikut:

- Binder (Semen dan GGBFS) diaduk kering selama ±2 menit pada kecepatan satu.
- Agregat halus dimasukkan dan diaduk selama ±3 menit.
- Air yang telah dicampur *superplasticizer* ditambahkan secara bertahap dan diaduk pada kecepatan dua selama ±2 menit hingga terbentuk pasta.
- Agregat kasar dimasukkan dan diaduk hingga rata.
- Untuk variasi beton serat, serat PP ditambahkan pada tahap akhir dan diaduk hingga menyebar merata (homogen).

Sebelum pencetakan, dilakukan pengujian konsistensi beton segar menggunakan metode *Flow Table Test* sesuai standar ASTM 1437-07 dengan target diameter sebar 200–350 mm. Benda uji dicetak dalam cetakan silinder berdiameter 100 mm dan tinggi 200 mm. Setelah 24 jam, benda uji dilepas dari cetakan (*demoulding*) dan dirawat (*curing*) dengan metode perendaman dalam air hingga umur pengujian 28 hari.

Pengujian Mekanis Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari mengacu pada SNI 03-1974-2011 menggunakan mesin uji tekan *Universal Testing Machine* (UTM). Untuk

mendapatkan kurva hubungan *stress-strain*, deformasi aksial benda uji selama pembebanan diukur secara presisi menggunakan *dial gauge*. Data beban dan deformasi dicatat secara kontinyu mulai dari kondisi elastis hingga benda uji mengalami keruntuhan. Pola retak yang terbentuk pada permukaan silinder diamati dan didokumentasikan sesaat setelah pengujian selesai untuk menganalisis jenis keruntuhan yang terjadi (getas atau daktil).

Reliabilitas hasil pengujian di setiap variasi campuran dibuat dengan jumlah replikasi minimum $n \geq 3$ benda uji silinder untuk pengujian kuat tekan dan pencatatan kurva *stress-strain*. Nilai kuat tekan dan parameter deformasi yang diperoleh kemudian dianalisis secara statistik menggunakan rata-rata (mean), standar deviasi (SD), dan koefisien variasi (CoV) untuk menilai konsistensi data antar replikasi.

Perhitungan dilakukan dengan persamaan berikut:

- Rata-rata (mean)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

- Standar deviasi (SD)

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

- Koefisien variasi (CoV)

$$CoV(\%) = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100\% \quad (3)$$

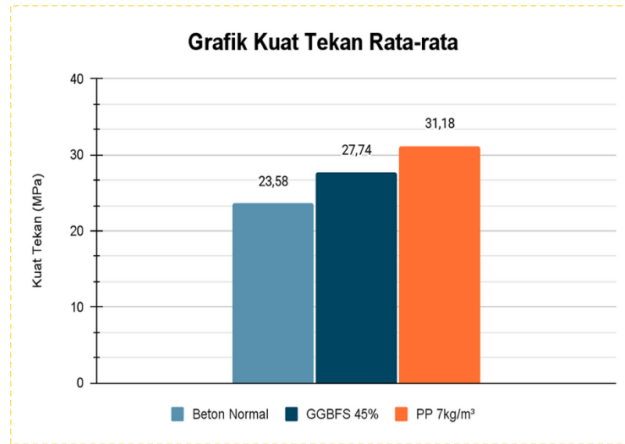
Nilai SD menunjukkan sebaran hasil uji terhadap nilai rata-rata, sedangkan CoV digunakan sebagai indikator variasi relatif. Semakin kecil nilai CoV, semakin baik konsistensi hasil pengujian untuk campuran yang sama. Seluruh hasil pengujian kemudian disajikan dalam bentuk $\text{mean} \pm \text{SD}$, serta CoV (%) untuk tiap variasi campuran.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Material Penelitian Material *binder* yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari Semen PCC dan GGBFS yang Kuat Tekan Beton dengan *marginal binder* Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari untuk mengevaluasi kinerja mekanis dari beton yang menggunakan material *marginal binder*. Hasil pengujian rata-rata dari tiga benda uji untuk setiap variasi campuran disajikan dalam **Tabel 2** dan **Gambar 2**.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kuat Tekan Rata-rata Umur 28 Hari (Sumber: Hasil Analisis Data)

Kode Sampel	Deskripsi Campuran	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Persentase Peningkatan (%)
BN	Beton Normal (Kontrol)	23,58	-
GGBFS 45%	Substitusi GGBFS 45%	27,74	17,64%
PP 7kg	GGBFS 45% + Serat PP 7kg	31,18	32,23%



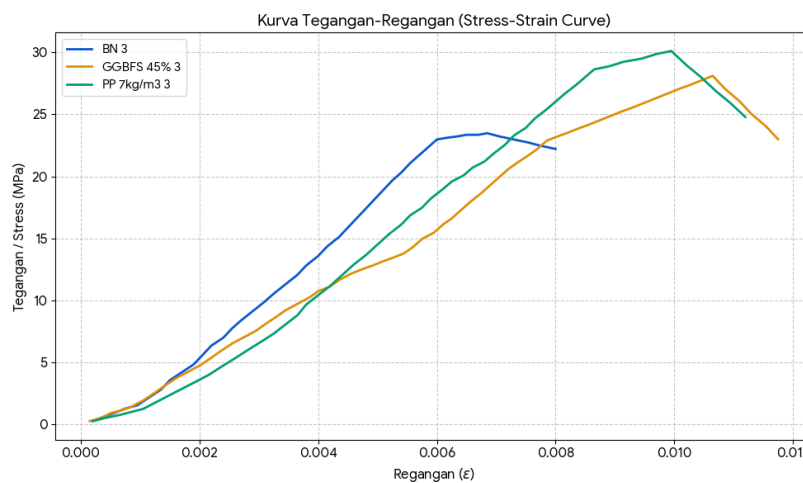
Gambar 2 Grafik Kuat Tekan Rata-Rata

Berdasarkan data pada **Tabel 1**, Beton Normal (BN) yang menggunakan 100% semen PCC dengan berat jenis rendah ($2,93 \text{ gr/cm}^3$) menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 23,58 MPa. Meskipun material penyusunnya dikategorikan *marginal binder*, beton ini masih mampu mencapai kekuatan struktural, namun nilainya merupakan yang terendah dibandingkan variasi lainnya.

Substitusi semen dengan GGBFS (berat jenis $2,84 \text{ gr/cm}^3$) sebanyak 45% justru memberikan dampak positif yang signifikan. Kuat tekan meningkat menjadi 27,74 MPa, atau mengalami kenaikan sebesar 17,64% dibandingkan beton normal. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa meskipun GGBFS memiliki berat jenis yang rendah, reaktivitas pozzolanik material tersebut berjalan efektif dalam jangka panjang.

Peningkatan mutu paling optimum terjadi pada campuran kombinasi GGBFS 45% dengan serat PP dosis 7 kg/m^3 . Variasi ini menghasilkan kuat tekan rata-rata 31,18 MPa, yang setara dengan peningkatan sebesar 32,23% terhadap beton normal. Kehadiran serat PP memberikan efek pengekan (*confinement effect*) pada matriks beton saat menerima beban tekan, yang mencegah terjadinya *micro-cracking* dini dan memungkinkan beton menahan beban yang lebih besar sebelum runtuh.

Analisis Hubungan *Stress-Strain* Perilaku keruntuhan beton dianalisis melalui kurva hubungan tegangan-regangan yang diperoleh dari pembacaan *dial gauge* selama pembebanan aksial. Perbandingan karakteristik kurva antara beton normal, beton GGBFS, dan beton serat disajikan pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Grafik Tegangan-Regangan dari Beton Normal, dan Beton + GGBFS 45%

Berdasarkan hasil analisis grafik tegangan-regangan pada **Gambar 3**, perhitungan kemiringan garis secant pada 40% dari tegangan puncak (batas elastis linier), spesimen beton normal (BN) menunjukkan tingkat kekakuan struktural tertinggi dengan nilai modulus elastisitas mencapai 3290,88 MPa. Sebaliknya, penambahan material GGBFS dan serat PP mengakibatkan penurunan kekakuan awal secara marjinal; di mana spesimen GGBFS 45% dan spesimen berserat PP 7kg/m³ masing-masing mencatatkan modulus elastisitas sebesar 2681,87 MPa dan 2803,53 MPa. Penurunan modulus ini mengindikasikan bahwa penggunaan *slag* dan serat polimer memberikan matriks mikro yang lebih fleksibel pada fase pembebanan awal dibandingkan dengan beton konvensional yang kaku.

Fleksibilitas matriks ini berbanding lurus dengan kapasitas regangan spesimen saat mencapai tegangan maksimumnya (*peak strain*). Beton BN mengalami kegagalan pada titik regangan puncak yang relatif kecil, yaitu 0,00685 mm/mm, yang merepresentasikan karakteristik kegagalan getas (*brittle failure*) khas beton polos. Di sisi lain, spesimen GGBFS 45% dan PP 7kg/m³ mampu menunda fase kegagalan strukturalnya secara signifikan, berturut-turut mencapai nilai regangan puncak sebesar 0,01065 mm/mm dan 0,00995 mm/mm. Peningkatan kapasitas elongasi ini membuktikan adanya perbaikan substansial pada perilaku deformasi pra-puncak (*pre-peak deformation behavior*).

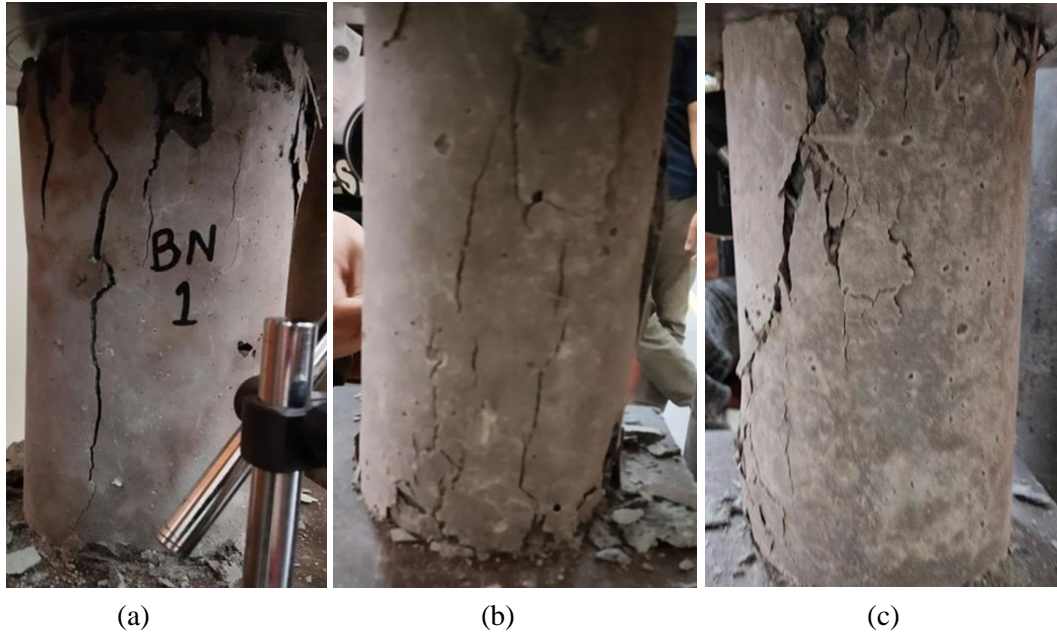
Keunggulan perilaku pasca-retak dari beton GGBFS dan serat PP ditunjukkan secara mutlak oleh parameter *toughness* (kapasitas absorpsi energi mekanik), yang diekstraksi melalui integral luasan area di bawah kurva tegangan-regangan. Beton BN hanya mampu menyerap energi sebesar 0,1060 MJ/m³ sebelum akhirnya runtuh total. Namun, substitusi semen menggunakan 45% GGBFS terbukti mampu meningkatkan *toughness* secara drastis menjadi 0,1810 MJ/m³, atau mengalami lonjakan kapasitas serapan energi sebesar 70,7% dibandingkan beton kontrol. Pola ketahanan yang ekuivalen juga terekam pada beton dengan penambahan serat PP 7 kg/m³ yang mencatatkan nilai *toughness* sebesar 0,1799 MJ/m³. Tingginya nilai luasan integral ini memverifikasi efektivitas material dalam mendistribusikan tegangan internal dan menjembatani perambatan retak mikro (*crack-bridging effect*) selama proses pembebanan berlangsung.

Tingkat keuletan spesimen juga dievaluasi menggunakan parameter Indeks Daktilitas (μ), yang merepresentasikan rasio antara regangan ultimit terhadap regangan puncak. Berdasarkan hasil pembacaan kurva, spesimen BN, GGBFS 45%, dan PP 7kg/m³ masing-masing mencatatkan indeks daktilitas kompresi sebesar 1,17; 1,10; dan 1,13. Secara keseluruhan, integrasi parameter serapan energi (*toughness*) yang masif dan regangan puncak yang lebar mengonfirmasi bahwa substitusi GGBFS maupun penambahan serat polipropilena tidak hanya berimplikasi pada peningkatan kuat tekan, tetapi juga sukses mereduksi sifat getas beton dan mengubah mekanisme keruntuhannya menjadi jauh lebih ulet (*ductile*).

Pola Retak dan Mode Keruntuhan Pengamatan visual terhadap benda uji pasca-pengujian (**Gambar 4**) mengonfirmasi analisis grafik tegangan-regangan di atas.

Pada Beton Normal, benda uji mengalami kerusakan berupa retakan vertikal yang lebar dan panjang di sepanjang tinggi silinder. Terjadi fenomena *spalling* atau lepasnya selimut beton, yang menyebabkan hancurnya integritas benda uji seketika sesaat setelah beban puncak terlampaui pada deformasi yang relatif kecil. Pola keruntuhan ini adalah tipikal kegagalan tekan murni pada material getas, yang juga secara kuantitatif dibuktikan dengan nilai kapasitas serapan energi terendah dari hasil pengujian, yaitu sebesar 0,1060 MJ/m³.

Pada beton dengan substitusi GGBFS 45%, pola retak yang terbentuk terlihat lebih sedikit dibandingkan beton normal.



Gambar 4 Pola Retak Sampel Beton Setelah Uji Kuat Tekan Beton pada (a) Beton Normal, (b) Beton + GGBFS 45%, (c) Beton + GGBFS 45% + PP 7Kg/m³

Hal ini berkorelasi dengan karakteristik material substitusi GGBFS yang menciptakan mikrostruktur matriks yang lebih padat dan homogen, sehingga jalur perambatan retak mikro menjadi lebih sulit. Mekanisme hambatan retak internal ini memungkinkan beton menahan deformasi yang lebih besar sebelum runtuh, yang ditunjukkan oleh tingginya nilai *toughness* spesimen mencapai 0,1810 MJ/m³. Namun, karena tidak adanya tulangan serat yang menyeberangi retakan makro, beton ini pada fase ultimitnya tetap menunjukkan kecenderungan pecah atau terbelah saat kegagalan total terjadi.

Sementara itu, benda uji dengan penambahan GGBFS 45% + serat PP 7 kg/m³ menunjukkan integritas struktur pasca-puncak yang paling baik. Benda uji tetap menyatu utuh meskipun telah mengalami deformasi yang besar. Pola retak yang muncul didominasi oleh retak rambut yang menyebar secara merata, bukan retakan tunggal yang masif. Secara visual, serat monofilamen terlihat melintang di antara celah retakan dan sukses menahan kedua sisi beton agar tidak terpisah (efek *crack-bridging*). Mekanisme inilah yang secara efektif mereduksi hilangnya tegangan secara tiba-tiba pada lintasan menurun kurva tegangan-regangan, mengubah mode keruntuhan material dari getas menjadi daktil, serta mempertahankan nilai *toughness* tetap tinggi (0,1799 MJ/m³). Perilaku daktil ini sangat diinginkan dalam aplikasi struktural karena mampu memberikan peringatan dini dan mencegah terjadinya keruntuhan mendadak (*sudden failure*).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi kelayakan penggunaan material marginal binder pada beton dengan substitusi 45% GGBFS serta pengaruh penambahan serat PP 7 kg/m³ terhadap perilaku mekanis, kurva tegangan-regangan, dan pola retak. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Kelayakan marginal binder untuk beton mutu normal. Meskipun material binder tergolong marginal (BJ semen 2,93 gr/cm³ dan BJ GGBFS 2,84 gr/cm³), campuran beton yang dirancang masih mampu mencapai kuat tekan beton mutu normal pada umur 28 hari. Hal ini menunjukkan bahwa kekurangan parameter fisik (berat jenis) dapat dikompensasi melalui rekayasa komposisi campuran yang tepat.

- b. Substitusi semen dengan 45% GGBFS meningkatkan kuat tekan rata-rata dari 23,58 MPa (BN) menjadi 27,74 MPa, atau naik 17,64%. Peningkatan ini mengindikasikan kontribusi reaksi pozzolanik dan perbaikan densifikasi matriks pada umur 28 hari meskipun GGBFS yang digunakan bersifat marginal.
- c. Penambahan serat PP 7 kg/m³ pada campuran GGBFS 45% memberikan kuat tekan rata-rata tertinggi, yaitu 31,18 MPa, meningkat 32,23% dibanding beton normal. Serat memberikan efek pengeangan dan menunda mikroretak awal, sehingga kapasitas beban puncak meningkat.
- d. Beton kontrol menunjukkan modulus elastisitas (secant 40% f_c) tertinggi (≈ 3290,88 MPa), sementara campuran GGBFS 45% dan GGBFS 45% + PP mengalami penurunan kekakuan awal (≈ 2681,87 MPa dan 2803,53 MPa). Namun, regangan puncak meningkat dari beton normal (≈ 0,00685 mm/mm) menjadi lebih tinggi pada GGBFS 45% (≈ 0,01065 mm/mm) dan PP 7 kg/m³ (≈ 0,00995 mm/mm), menandakan kemampuan deformasi pra-puncak yang lebih baik.
- e. Nilai toughness beton normal tercatat sekitar 0,1060 MJ/m³, sedangkan campuran GGBFS 45% meningkat menjadi 0,1810 MJ/m³ (≈ +70,7%), dan campuran GGBFS 45% + PP mencapai 0,1799 MJ/m³. Hal ini memverifikasi kemampuan campuran untuk mempertahankan kapasitas pasca-puncak dan menyerap energi deformasi lebih besar dibanding beton kontrol.
- f. Beton normal didominasi retak vertikal besar dan spalling yang mengarah pada keruntuhan getas. Campuran GGBFS 45% menunjukkan retak lebih sedikit namun masih cenderung terbelah pada fase ultimit. Campuran GGBFS 45% + PP memperlihatkan integritas pasca-puncak terbaik dengan retak rambut menyebar serta mekanisme crack-bridging oleh serat, sehingga keruntuhan lebih terkendali dan lebih “daktail” secara perilaku.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, J., Burduhos-Nergis, D. D., Arbili, M. M., Alogla, S. M., Majdi, A., & Deifalla, A. F. (2022). A Review on Failure Modes and Cracking Behaviors of Polypropylene Fibers Reinforced Concrete. In *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings12111951>
- Al-Mansour, A., Chow, C. L., Feo, L., Penna, R., & Lau, D. (2019). Green concrete: By-products utilization and advanced approaches. In *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su11195145>
- Andrew, R. M. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928-2018. In *Earth System Science Data*. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- Cheng, D., Reiner, D. M., Yang, F., Cui, C., Meng, J., Shan, Y., Liu, Y., Tao, S., & Guan, D. (2023). Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43660-x>
- Dräger, P., & Letmathe, P. (2022). Value losses and environmental impacts in the construction industry – Tradeoffs or correlates? *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130435>
- Farhan, K. Z., Megat, A. M. J., & Demirboğa, R. (2023). Performance of polypropylene fiber reinforced GGBFS-based alkali activated composites under sulfate and freeze–thaw conditions. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02137-5>
- Guo, Y., Luo, L., Liu, T., Hao, L., Li, Y., Liu, P., & Zhu, T. (2024). A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. In *Journal of*

Environmental Sciences (China). <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.021>

- Hamad, M. A., Nasr, M., Shubbar, A., Al-Khafaji, Z., Al Masoodi, Z., Al-Hashimi, O., Kot, P., Alkhaddar, R., & Hashim, K. (2021). Production of ultra-high-performance concrete with low energy consumption and carbon footprint using supplementary cementitious materials instead of silica fume: A review. In *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en14248291>
- Hosseinzadeh, H., Masoud Salehi, A., Mehraein, M., & Asadollahfardi, G. (2023). The effects of steel, polypropylene, and high-performance macro polypropylene fibers on mechanical properties and durability of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131589>
- Jasim, A. M. D. A., Wong, L. S., Kong, S. Y., Al-Zand, A. W., & Midhin, M. A. K. (2023). An Evaluative Review of Recycled Waste Material Utilization in High-Performance Concrete. In *Civil Engineering Journal (Iran)*. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-11-020>
- Kumar, K., Dixit, S., Arora, R., Vatin, N. I., Singh, J., Soloveva, O. V., Ilyashenko, S. B., John, V., & Buddhi, D. (2022). Comparative Analysis of Waste Materials for Their Potential Utilization in Green Concrete Applications. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma15124180>
- Lai, M. H., Huang, Z. C., Wang, C. T., Wang, Y. H., Chen, L. J., & Ho, J. C. M. (2022). Effect of fillers on the behaviour of low carbon footprint concrete at and after exposure to elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104117>
- Li, J. J., Niu, J. G., Wan, C. J., Jin, B., & Yin, Y. L. (2016). Investigation on mechanical properties and microstructure of high performance polypropylene fiber reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.116>
- Lima, L., Trindade, E., Alencar, L., Alencar, M., & Silva, L. (2021). Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature. In *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125730>
- Liu, J., Wu, Y., Qu, F., Zhao, H., & Su, Y. (2024). Assessment of CO₂ Capture in FA/GGBS-Blended Cement Systems: From Cement Paste to Commercial Products. *Buildings*. <https://doi.org/10.3390/buildings14010154>
- Murthy, S. S., & Patil, N. N. (2022). Mechanical and durability characteristics of flyash and GGBFS based polypropylene fibre reinforced geopolymer concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.036>
- Omer, B., Saeed, N. M., Dheyaaldin, M. H., Jamal, A. S., & Kurda, R. (2025). Evaluating the long-term strength of GGBFS-blended cement across various water-to-binder and superplasticizer ratios under heating/cooling cycles. *PLOS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319923>
- Prasanna, P. K., Srinivasu, K., & Ramachandra Murthy, A. (2021). Strength and durability of fiber reinforced concrete with partial replacement of cement by Ground Granulated Blast Furnace Slag. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.267>
- Sandanayake, M. S. (2022). Environmental Impacts of Construction in Building Industry—A Review of Knowledge Advances, Gaps and Future Directions. *Knowledge*. <https://doi.org/10.3390/knowledge2010008>

Thakur, G., Singh, Y., Singh, R., Prakash, C., Saxena, K. K., Pramanik, A., Basak, A., & Subramaniam, S. (2022). Development of GGBS-Based Geopolymer Concrete Incorporated with Polypropylene Fibers as Sustainable Materials. *Sustainability (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/su141710639>