Presisi: Jurnal Teknologi Rekayasa dan Inovasi Teknik
Volume: 1, Nomor: 3, (2026), September: 88 - 114
Website: https://ejournal.ojs-lppm.com/index.php/Presisi/article/view/464
E-ISSN: 3164-4694

PENGARUH SUBTITUSI FLY ASH DENGAN TAMBAHAN SERAT BAJA PADA BETON *SELF-COMPACTING CONCRETE* (SSC)

Darma Indar Sri Setiyawan[1], Dewa Danendra[2], Sumirin[3], Muhammad Rusli Ahyar[4]
Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia [1,2,3,4]
Corresponding Author: *darmaindar407@gmail.com[1*]*

Info Artikel
Received: *18 Agustus 2026*
Revised : *29 Agustus 2026*
Accepted: *17 September 2026*
Published: *27 September 2026*

Keywords: *self-compacting concrete, fly ash, dramix steel fiber, splitting tensile strength, flexural strength.*

Abstract
Conventional concrete has a drawback, namely requiring very intensive mechanical compaction, so the innovation of Self-Compacting Concrete (SCC) emerged which can flow and compact automatically. However, SCC with a high paste content tends to be brittle. To overcome the problem, this study utilizes fly ash waste as a partial replacement for cement and adds Dramix 3D 80/60 BG type steel fiber to increase the bearing capacity and durability of concrete. The method used is experimental research in the laboratory. The variations of fly ash substitution applied are 5%, 10%, 15%, 20%, while the variations in the addition of steel fiber consist of 2%, 3%, 4%, 5%. Fresh concrete characteristics testing is assessed using the Slump Flow, L-Box, and V-Funnel methods. Mechanical property tests include compressive strength, split tensile strength, and flexural strength carried out on 28-day-old concrete. The results of the fresh properties test show that the SCC mixture meets the EFNARC criteria standards, with a slump flow value of around ±700mm, L-Box 0.8, and V-Funnel 7.6 seconds in ordinary concrete. The results of the mechanical test show that the maximum compressive strength is obtained by using 15% fly ash with a value of 55.935 MPa, showing an increase of 68.32% compared to ordinary concrete. The maximum Split Tensile Strength is obtained at a variation of 4% steel fiber addition of 5.290 MPa. The best synergy combination (15% Fly Ash + 4% Steel Fiber) produces an average of 5.985 MPa, higher than normal concrete which has a value of 4.509 MPa.

Kata Kunci*: self-compacting concrete, fly ash*, serat baja dramix, kuat tekan,kuat tarik belah, kuat lentur.

Abstrak
Beton konvensional memiliki kekurangan, yaitu memerlukan pemadatan mekanis yang sangat intensif, sehingga muncul inovasi Self-Compacting Concrete (SCC) yang bisa mengalir dan memadat secara otomatis.Namun, SCC dengan kandungan pasta yang tinggi cenderung menjadi rapuh. Untuk mengatasi masalah, penelitian ini memanfaatkan limbah fly ash sebagai pengganti Sebagian semen dan menambahkan serat baja (steel fiber) tipe Dramix 3D 80/60 BG untuk meningkatkan deya dukung serta ketahanan beton. Metode yang dipakai Adalah penelitian eksperimental di dalam labolatorium. Variasi substitusi fly ash yang diterapkan Adalah 5%, 10%, 15%, 20%, sedangkan variasi penambahan serat baja terdiri dari 2%, 3%, 4%, 5%. Pengujian karakteristik segar bbeton dinilai dengan metode Slump Flow,L-Box,dan V-Funnel. Uji sifat mekanis mencakup kuat tekan, kuat Tarik belah, dan kuat lentur yang dilakukan pada beton umur 28 hari. Hasil uji sifat segar menunjukkan bahwa campuran SCC

memenuhi standar kriteria EFNARC, dengan nilai slump flow sekitar ±700mm, L-Box 0,8 , dan V-Funnel 7,6 detik pada beton biasa. Hasil dari uji mekanik menunjukkan, kuat tekan maksimum diperoleh pada penggunaan fly ash sebayak 15% dengan nilai 55,935 MPa, menunjukkan peningkatan sebesar 68,32% dibandingkan dengan beton biasa. Kekuatan Tarik Belah masimum diperoleh pada variasi penambahan serat baja 4% sebesar 5,290 MPa. Kombinasi sinergi terbaik (Fly Ash 15% + Sserat Baja 4%) menghahsilkan rata-rata 5,985 MPa, lebih tinggi daripada beton normal yang memiliki nilai 4,509 MPa.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
Publisher: Lembaga Penerbit Penelitian Multidisipliner

PENDAHULUAN

Beton merupakan material kontruksi yang paling banyak digunakan karena kuat tekan yang tinggi, kemudahan pembentukan dan biaya yang relative ekonomis, Namun beton konvensional masih memiliki beberapa kelemahan, antara lain memerlukan alat pemadat mekanis yang intensif dan rawan cacat seperti honeycomb pada daerah dengan penulangan rapat atau bentuk penampang yang rumit. Hal ini mendorong pengembangan beton Self-Compacting Concrete (SCC), yaitu beton yang mampu mengalir dan memadat sendiri di bawah beratnya sendiri tanpa bantuan alat pemadat mekanis seperti vibrator, dengan tetap mempertahankan homogenitas dan ketahanan terhadap segregasi.(Arie Wardhono, 2021)

Perkembangan teknologi beton saat ini menuntut terciptanya material yang mampu dikerjakan dengan mudah, cepat dan berkualitas baik disegala medan yang kompleks tetapi memiliki kuat tekan yang tinggi. Salah satu inovasi yangbanyak diterapkan adalaj self-compacting concrete (SCC). Self-Compacting Concrete dirancang untuk memiliki kemampuan mengisi (*filling ability*), kemampuan melewati celah tulangan (*passing ability*), dan ketahanan terhadap pemisahan (segregation resistance) yang baik, sehingga sangat sesuai untuk elemen struktural dengan penulangan padat dan detail yang kompleks(Ramesh, 2021). Untuk mencapai sifat tersebut, SCC umumnya menggunakan pasta yang lebih banyak, agregat halus yang lebih tinggi, serta bahan tambahan mineral (mineral admixture) seperti fly ash guna meningkatkan workability dan stabilitas campuran. Penggunaan SCC diharapkan tidak hanya meningkatkan kualitas hasil pengecoran, tetapi juga efisiensi waktu pelaksanaan dan pengurangan kebisingan akibat penggunaan alat pemadat di lapangan.

Di sisi lain, sektor pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) menghasilkan limbah fly ash dalam jumlah besar yang berpotensi menimbulkan masalah lingkungan jika tidak dimanfaatkan dengan baik. Fly ash, khususnya dengan karakter pozzolan dan/atau sifat sementan, dapat digunakan sebagai

bahan pengganti sebagian semen (substitusi) dalam campuran beton untuk meningkatkan workability, mengurangi panas hidrasi, dan memperbaiki sifat durabilitas jangka panjang. Pada beton SCC, keberadaan fly ash yang berukuran halus dan berbentuk bulat umumnya dapat memperbaiki sifat alir, mengurangi kebutuhan air, serta mendukung konsep high volume fly ash SCC (HVFA-SCC) yang lebih ramah lingkungan (Much Suranto et al., 2024).

Meskipun demikian, beton SCC dengan kadar pasta tinggi cenderung bersifat lebih getas dan rentan terhadap retak, terutama ketika menerima beban tarik, lentur, atau beban berulang. Salah satu pendekatan untuk meningkatkan ketangguhan dan daktilitas beton adalah penambahan serat (fiber reinforced concrete), di mana serat baja (steel fiber) telah terbukti mampu menghambat propagasi retak, meningkatkan kapasitas pasca-retak, serta memperbaiki kuat tarik lentur dan energi serap beton(Patel et al., 2022). Kombinasi SCC dengan serat baja (steel fiber reinforced SCC) berpotensi menghasilkan beton yang tidak hanya mudah mengalir dan memadat sendiri, tetapi juga memiliki perilaku mekanis yang lebih daktail dan tahan retak.

Berdasarkan uraian tersebut, diperlukan penelitian mengenai pengaruh substitusi fly ash yang dikombinasikan dengan penambahan serat baja terhadap kinerja beton SCC, baik pada sifat segar maupun sifat mekanisnya (misalnya kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur). Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai komposisi optimum penggunaan fly ash sebagai pengganti sebagian semen dan dosis serat baja yang tepat sehingga diperoleh beton SCC yang memiliki workability baik, kuat mekanis memadai, dan ketangguhan yang lebih tinggi serta sekaligus mendukung pemanfaatan limbah industri secara berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Metode Persiapan

Penelitian ini dilakukan secara bertahap dan dilakukan dengan cara percobaan (*trial*). Penelitian ini dilakukan dengan mengacu SNI untuk menentukan jenis dan jumlah benda uji. Untuk mencapai tujuan penelitian, metodologi penelitian terdiri dari 7 (tujuh) tahapan kegiatan.

Tahapan pertama kajian pustaka, untuk mengetahui kelebihan dan kekurangan dari beton SCC Steel Fiber oleh peneliti terdahulu. Yang dimana di dalam penelitian ini akan dikembangkan sesuai dengan tujuan penelitian.

Tahap Kedua kajian pustaka dalam menentukan bahan susun Beton SCC Steel Fiber. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan bahan susun Beton SCC Steel Fiber yang sesuai standar seperti air, agregat halus, agregat kasar, semen, fly ash, superplasticizer, dan bahan susun utama yang lainnya.

Tahap ketiga penentuan jumlah bahan susun Beton SCC Steel Fiber, seperti prosentase perbandingan berat jenis agregat kasar dan halus yang dimana harus sesuai denga model yang akan dibuat. Sebelum pembuatan benda uji, akan dilakukan percobaan (Trial) terlebih dahulu untuk menentukan kadar viscocrete yang optimum sesuai dengan standar Beton SCC Steel Fiber

Tahap keempat adalah pembuatan benda uji. Yang terdiri dari benda uji berserat baja ditambah viscocrete yang berfungsi sebagai beton SCC.

Tahap kelima membuat perancangan campuran Beton Steel Fiber. Selanjutnya menghitung kebutuhan bahan susun beton dengan penambahan Viscocrete

Tahap keenam, pengujian kuat tekan beton umur 28 hari dengan beton silinder 150x300 mm. Hasil uji akan mendapatkan nilai fe' yang dimana nilai itu akan menjadi acuan dari mutu beton berserat baja SCC.

Tahap ketujuh setelah semua model dan design campuran beton SCC dengan serat baja diperoleh, langkah selanjutnya adalah menganalisis hasil percobaan (Trial) dan permodelan.

Metode Pengujian

Metodologi penelitian merupakan serangkaian prosedur sistematis yang digunakan untuk mengumpulkan, menganalisis, mencatat, serta menafsirkan data dengan tujuan memperoleh informasi yang relevan dalam upaya memecahkan suatu permasalahan penelitian. Dalam penyusunan tugas akhir ini, sumber informasi yang digunakan terutama berasal dari data primer. Data primer merupakan data asli yang diperoleh secara langsung melalui kegiatan eksperimen di laboratorium, tanpa melalui perantara atau sumber sekunder. Informasi yang dikumpulkan dari hasil pengujian laboratorium meliputi:

1. Kadar lumpur agregat
2. Kadar air agregat
3. Analisis saringan agregat
4. Perbandingan campuran beton scc
5. Nilai slump
6. Uji kekuatan tekan beton
7. Uji Tarik beton
8. Uji kekuatan lentur beton

Metode Pengolahan Hasil

Berdasarkan penelitian ini,maka digunakan metode pengolahan hasil secara labolatorium dan

Analisa perhitungan Pada laboratorium hasil pengujian yang diperoleh meliputi hasil pengujian kuat tekan beton,dan hasil pengujian kuat Tarik belah beton. Kemudian untuk menganalisis menggunakan hasil pengujian beton dapat dianalisis dengan cara berikut:

$$Kuat\ Tekan\ (Fc') = \frac{P}{A}\ MPa$$

$$Kuat\ Tarik\ Belah\ (Ft) = \frac{2\ P}{\pi^2\ D}\ MPa$$

$$KuatTarik\ Lentur\ (MR) = \frac{PL}{bh^2}\ kg/cm^2$$

Selain pengujian secara eksperimental di laboratorium, dilakukan pula analisis korelasi data untuk memvalidasi hasil pengujian. Hal ini bertujuan untuk membandingkan nilai kuat tarik belah dan kuat lentur aktual hasil laboratorium dengan nilai prediksi teoritis berdasarkan standar SNI 2847:2019. Korelasi ini digunakan untuk melihat sejauh mana penambahan serat baja Dramix mampu meningkatkan kinerja beton melampaui prediksi beton konvensional.

$$Prediksi\ Kuat\ Tarik\ Belah\ (Fct) = 0{,}56\sqrt{fc'}\ MPa$$

$$Prediksi\ Kuat\ Tarik\ Lentur\ (Fr) = 0{,}62\sqrt{fc'}\ MPa$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Job Mix Design Final

Tabel 1. *Mix Design Beton Per 1 m3 (w/c = 0.46)*

Material	**Dramix 4% + Fly Ash 15%**		
	Jumlah per 1m³	**Jumlah per 1 silinder**	**Jumlah per 1 balok**
Semen(kg/m³)	414,8	2,19	6,59
Fly Ash(kg/m³)	73,2	0,387	0,99
Agregat Halus(kg/m³)	733	3,88	9,89
Agregat Kasar(kg/m³)	896	4,74	12,09
Air(lt/m³)	225	1,19	3,03
Obat(lt/m³)	4,392	0,024	0,065
Serat Baja(kg/m³)	93,87	0,497	1,26

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Sebagai tahap akhir perencanaan, Tabel 1 merinci kebutuhan bahan untuk setiap jenis benda uji, baik silinder maupun balok. Rincian ini menjadi panduan utama dalam proses produksi di lapangan untuk memastikan volume adukan yang dibuat mencukupi seluruh kebut han pengujian

mekanis tanpa terjadi pemborosan u material yang berlebihan.

Standar Pengujian SCC

1. Slump Flow

Tabel 2. *Perbandingan Slump Flow Beton Variasi Fly Ash*

No	Kode Benda Uji	Hasil Uji Slup Flow (mm)	Rata-rata
1	Normal	700	690
2	Normal	680	
3	Fly Ash 5%	677	673,5
4	Fly Ash 5%	670	
5	Fly Ash 10%	668	666,5
6	Fly Ash 10%	665	
7	Fly Ash 15%	655	651,5
8	Fly Ash 15%	648	
9	Fly Ash 20%	615	612,5
10	Fly Ash 20%	610	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 2 di atas, terlihat adanya trend penurunan linear pada nilai *slump flow* seiring dengan meningkatnya persentase substitusi *fly ash*. Beton normal memiliki nilai sebaran tertinggi sebesar 690 mm. Nilai tersebut mengalami reduksi secara bertahap menjadi 673,5 mm pada *Fly Ash* 5%, hingga mencapai titik terendah pada variasi *Fly Ash* 20% dengan nilai 612,5 mm. Meskipun terdapat penurunan kemampuan alir, seluruh variasi *fly ash* tunggal ini masih menunjukkan kinerja *filling ability* yang baik karena masih mendekati rentang standar SCC yang direncanakan, yaitu 650 mm – 800 mm.

Tabel 3. *Perbandingan Slump Flow Beton Variasi Dramix 3D 80/60 BG*

No	Kode Benda Uji	Hasil Uji Slup Flow (mm)	Rata-rata
1	Normal	700	690
2	Normal	680	
3	Serat Baja 2%	668	666
4	Serat Baja 2%	664	
5	Serat Baja 3%	638	647
6	Serat Baja 3%	656	

7	Serat Baja 4%	610	617
8	Serat Baja 4%	624	
9	Serat Baja 5%	603	580
10	Serat Baja 5%	557	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 3 pengaruh penambahan serat baja (Dramix) terhadap *workability* beton menunjukkan trend penurunan yang lebih signifikan dibandingkan dengan substitusi *fly ash*. Data pengujian menunjukkan bahwa penambahan serat baja 2% menurunkan nilai *slump flow* menjadi 666 mm, dan terus menurun drastis hingga mencapai 580 mm pada kadar serat 5%. Hal ini disebabkan oleh adanya hambatan mekanis dan gesekan internal dari serat baja yang mengganggu mobilitas adukan beton segar. Variasi serat baja 5% (580 mm) tercatat berada di bawah standar minimum SCC (650 mm), sehingga pada kadar tersebut beton kehilangan sifat *self-compatibility*-nya.

Tabel 4. *Perbandingan Slump Flow Flay Ash 4% + Dramix 3D 80/60 BG 15%*

No	Kode Benda Uji	Hasil Uji Slup Flow (mm)	Rata-rata
1	Normal	700	690
2	Normal	680	
3	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	644	648
4	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	652	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Pada pengujian variasi campuran (kombinasi *Fly Ash* 15% + Serat Baja 4%), didapatkan nilai *slump flow* rata-rata sebesar 648 mm. Jika dibandingkan dengan beton normal (690 mm), variasi campuran ini mengalami penurunan yang cukup stabil. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua material tambahan tersebut menghasilkan tingkat kekentalan yang masih mampu memenuhi kriteria operasional di lapangan, meskipun berada sedikit di ambang batas bawah standar SCC.

Secara keseluruhan, pengujian *workability* pada seluruh variasi menunjukkan trend dekselerasi (penurunan) kemampuan alir beton segar seiring dengan peningkatan kadar material tambahan. Meskipun demikian, mayoritas campuran tetap berada dalam koridor standar EFNARC untuk beton memadat sendiri (SCC), yaitu antara 650 mm hingga 800 mm, kecuali pada variasi serat baja 5% yang menunjukkan nilai di bawah ambang batas minimum. Hal ini mengonfirmasi bahwa penambahan *fly ash* hingga 20% dan serat baja hingga 4% masih kompatibel dengan rancangan *mix design* SCC, namun memerlukan kontrol yang lebih ketat pada penggunaan superplasticizer guna menjaga konsistensi aliran beton.

L-Box Test

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa pada variasi normal, beton memiliki rasio 0,85 yang memenuhi syarat rentang ideal SCC yaitu 0,8 – 1,0.

Tabel 5. *Hasil Pengujian L-Box Test*

No	Kode Benda Uji	Hasil Uji L-Box Test (cm)
1	Normal	0,98
2	Flay Ash 15%	0,88
3	Serat Baja 4%	0,94
4	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	0,85

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 5, hasil pengujian menunjukkan nilai *blocking ratio* (H2/H1) mengalami dekselerasi (penurunan) seiring dengan penambahan variasi material. Beton normal mencatatkan rasio tertinggi sebesar 0,98, diikuti oleh variasi *fly ash* 15% sebesar 0,88, dan variasi serat baja 4% sebesar 0,94. Nilai terendah ditemukan pada variasi campuran sebesar 0,85. Meskipun terjadi penurunan, seluruh nilai tersebut masih berada di dalam batas toleransi EFNARC yaitu 0,8 – 1,0, sehingga beton tetap dikategorikan memiliki *passing ability* yang baik.

V-Funnel Test

Tabel 6. *Hasil Pengujian V-Funnel Test*

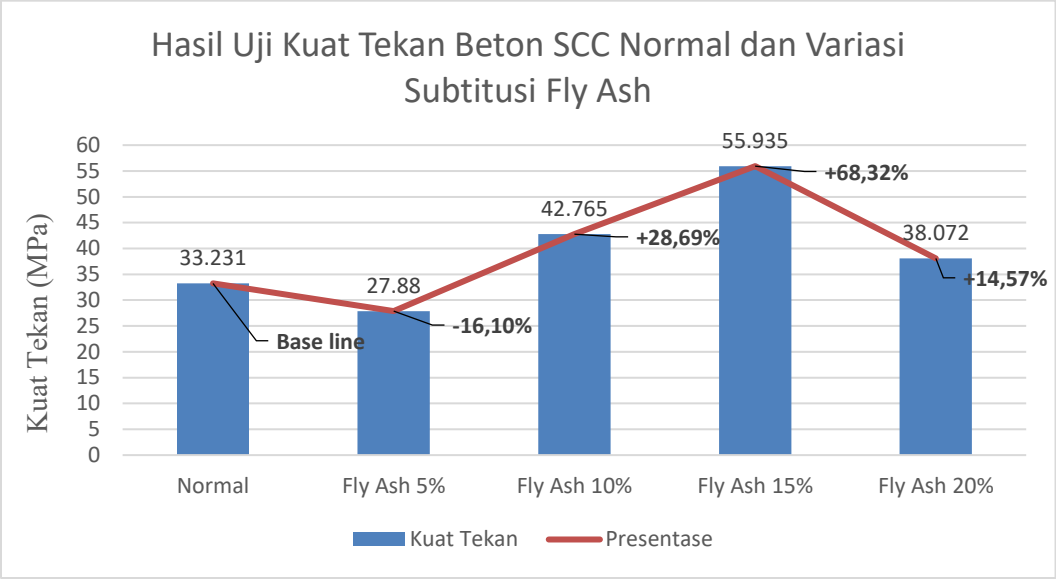
NO	Kode Benda Uji	Hasil Uji V-Funnel Test (detik)
1	Normal	8,43
2	Flay Ash 15%	9,08
3	Serat Baja 4%	10,23
4	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	11,48

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 6, terlihat adanya variasi durasi waktu alir yang dipengaruhi oleh komposisi material tambahan. Beton normal mencatatkan waktu tercepat sebesar 8,43 detik, yang kemudian meningkat menjadi 9,08 detik pada variasi *Fly Ash* 15%. Penambahan serat baja pada variasi ketiga memberikan dampak yang lebih signifikan dengan waktu alir 10,23 detik, dan mencapai puncaknya pada variasi campuran (*Fly Ash* 15% + Serat Baja 4%) dengan durasi 11,58 detik. Seluruh data hasil pengujian ini secara konsisten berada di dalam koridor standar operasional SCC, menunjukkan bahwa stabilitas campuran tetap terjaga meskipun terjadi peningkatan viskositas.

Uji Kuat Tekan Beton

1. Pengaruh Subtitusi Fly Ash Pada Beton SCC



Gambar 1. *Grafik Perbandingan Kuat Tekan Beton SCC Normal dan Variasi Subtitusi Fly Ash. (Sumber: Hasil Penelitian, 2026)*

Berdasarkan Gambar 1, terlihat tren kenaikan kuat tekan yang signifikan seiring bertambahnya kadar *fly ash* hingga mencapai titik optimal pada persentase 15%. Pada umur 28 hari, variasi Fly Ash 15% menunjukkan kekuatan tertinggi dengan nilai rata-rata sebesar 55,935 MPa. Lonjakan kekuatan ini mengindikasikan bahwa reaksi pozzolanik sekunder dari *fly ash* telah bekerja secara efektif dalam mengisi rongga-rongga kapiler dan menciptakan matriks beton yang lebih padat dibandingkan beton normal. Hal ini membuktikan bahwa substitusi *fly ash* pada kadar tertentu mampu meningkatkan kualitas antarmuka antara semen dan agregat secara optimal

Gambar 1 menunjukkan tren peningkatan kuat tekan yang konsisten pada seluruh variasi beton SCC seiring dengan bertambahnya persentase substitusi *fly ash* hingga titik optimum 15%. Puncak kekuatan tertinggi dicapai oleh variasi Fly Ash 15% dengan nilai rata-rata aktual sebesar 55,935 MPa pada umur 28 hari. Kenaikan yang tajam ini mengonfirmasi efektivitas reaksi pozzolanik dari *fly ash* yang mampu mengisi pori-pori mikro (*filler effect*) dan memperkuat ikatan antar agregat. Hasil pengujian ini menegaskan bahwa penggunaan *fly ash* sebagai material substitusi semen tidak hanya berfungsi sebagai pengisi, tetapi juga berkontribusi pada peningkatan mutu beton yang jauh melampaui kekuatan beton normal.

Tabel 7. *Presentase Kuat Tekan Beton Variasi Subtitusi Fly Ash*

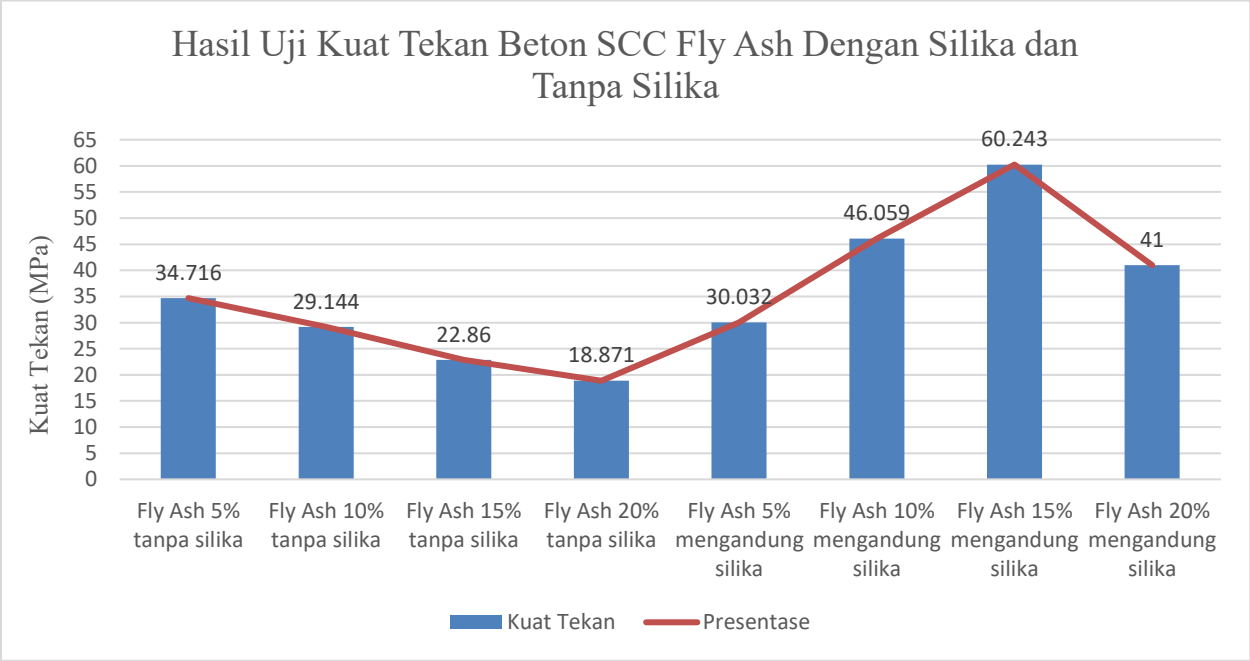
Variasi Campuran	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Selisih terhadap beton	Presentase Kenaikan dan	Status Performa

		Normal (MPa)	Penurunan (%)	
Beton Normal	33,231	-	-	Baseline
Fly Ash 5%	27,880	-5,351	-16,10%	Penurunan
Fly Ash 10%	42,765	+9,534	+28,69%	Peningkatan
Fly Ash 15%	55,935	+22,704	+68,32%	Optimum
Fly Ash 20%	38,072	+4,841	+14,57%	Penurunan Pasca Optimum

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 7 di atas, terlihat bahwa peningkatan kekuatan paling signifikan terjadi pada substitusi *fly ash* sebesar 15%, dengan kenaikan mencapai 68,32% dibandingkan beton normal. Hal ini membuktikan efektivitas *filler effect* dan reaksi pozzolanik yang mencapai puncaknya pada kadar tersebut. Namun, penambahan hingga 20% justru menurunkan efektivitas kekuatan, yang mengindikasikan bahwa kadar semen yang tersisa tidak lagi cukup untuk bereaksi secara optimal dengan jumlah *fly ash* yang berlebih.

2. Perbandingan Fly Ash Mengandung Silika dan Fly Ash Tanpa Silika



Gambar 2. *Grafik Perbandingan Kuat Tekan Beton SCC Variasi Subtitusi Fly Ash Mengandung Silika dan Variasi Subtitusi Fly Ash Tanpa Silika*
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Untuk memvalidasi temuan di atas, dilakukan pengujian komparatif antara *fly ash* yang mengandung silika dengan *fly ash* tanpa kandungan silika yang disajikan pada Gambar 2. Hasilnya

menunjukkan perbedaan karakteristik yang sangat signifikan pada umur 28 hari; pada kadar 15%, variasi tanpa silika hanya mampu mencapai kuat tekan rata-rata sebesar 22,860 MPa, sangat jauh jika dibandingkan dengan variasi mengandung silika yang mencapai 60,243 MPa. Perbedaan hasil yang kontras ini memberikan bukti empiris bahwa tanpa senyawa silika reaktif, *fly ash* hanya berfungsi sebagai pengisi fisik (*filler*) tanpa kontribusi kimiawi pozzolanik, yang mengakibatkan kurang optimalnya pembentukan ikatan pada pasta beton secara keseluruhan.

Berdasarkan perbandingan visual pada Gambar 2**,** terlihat deviasi kekuatan yang sangat mencolok antara penggunaan *fly ash* mengandung silika dengan *fly ash* tanpa silika pada umur 28 hari. Variasi tanpa silika menunjukkan penurunan performa yang signifikan, terutama pada kadar 15% di mana kekuatan beton justru menurun drastis dibandingkan kadar lainnya, berbanding terbalik dengan variasi mengandung silika yang mencapai puncak kekuatan di angka 60,243 MPa. Hal ini memberikan bukti kuat secara empiris bahwa ketiadaan senyawa silika reaktif menyebabkan *fly ash* kehilangan kemampuan pozzolaniknya, sehingga hanya bertindak sebagai material pengisi yang tidak stabil dan justru memperlemah struktur internal beton pada kadar substitusi yang tinggi.

Tabel 8. *Presentase Kuat Tekan Beton Subtitusi Fly Ash Mengandung Silika Dan Tanpa Silika*

Variasi Campuran	**Kuat Tekan Rata-rata (MPa)**		**Selisih terhadap beton Normal (MPa)**	**Presentase Kenaikan dan Penurunan (%)**	**Status Performa**
	Mengandung silika	**Tanpa silika**			
Fly Ash 5%	30,032	34,716	-4,684	-9,63%	Penurunan
Fly Ash 10%	46,059	29,144	+16,915	+38,60%	Peningkatan
Fly Ash 15%	60,243	22,860	+37,383	+81,28%	Optimum
Fly Ash 20%	41,00	18,871	+22,129	+23,38%	Penurunan Pasca Optimum

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 8, terlihat perbedaan kekuatan yang sangat kontras antara penggunaan *fly ash* mengandung silika dengan *fly ash* tanpa silika, di mana pada kadar 15% kuat tekan turun drastis dari 60,243 MPa menjadi hanya 22,860 MPa. Hal ini membuktikan secara nyata bahwa tanpa kandungan silika reaktif, *fly ash* tidak bisa bereaksi secara kimiawi dan hanya menjadi bahan pengisi biasa yang justru memperlemah ikatan dalam beton. Akibatnya, pada kadar yang tinggi, ketiadaan reaksi ini menyebabkan penurunan kekuatan yang sangat signifikan dibandingkan beton yang menggunakan silika.

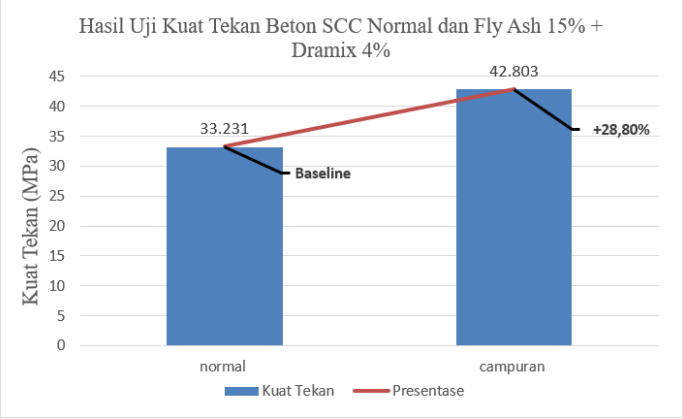
3. Pengaruh Campuran Serat Baja 4% dan Fly Ash 15%

Tabel 9. *Hasil Uji Kuat Tekan Beton Normal dan Beton dengan Penambahan Fly Ash 15% + Serat Baja 4%*

No	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Berat (kg)	Gaya (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata
1	Normal	28	12,85	604,683	34,72	33,231
2	Normal	28	12,57	665,726	38,255	
3	Normal	28	12,54	516,750	29,671	
4	Normal	28	13,02	527,339	30,279	
5	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	13,40	867,038	49,784	42,803
6	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	12,97	723,512	41,5430	
7	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	12,95	692,442	39,759	
8	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	13,12	698,886	40,129	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Analisis terakhir difokuskan pada pengaruh sinergi antara *fly ash* 15% dan penambahan Dramix 3D 80/60 BG (*steel fiber*) 4% yang disajikan pada Tabel 9. Berdasarkan data tersebut, campuran ini menunjukkan stabilitas kekuatan yang sangat baik dengan nilai rata-rata pada umur 28 hari mencapai 42,803 MPa. Secara teknis, sedikit penurunan kekuatan tekan ini dapat dipengaruhi oleh berkurangnya volume matriks pasta akibat adanya volume serat yang cukup besar, namun hal ini dikompensasi dengan peningkatan daktilitas yang signifikan. Serat baja dalam campuran ini berfungsi sebagai jembatan mikro (*bridging effect*) yang secara aktif menahan perambatan retak (*crack propagation*) saat beton menerima beban tekan maksimum. Mekanisme ini mengubah pola keruntuhan beton dari yang semula bersifat getas (*brittle failure*) pada beton mutu tinggi menjadi lebih ulet, sehingga integritas struktur tetap terjaga meskipun telah melewati batas beban puncak.



Gambar 3. *Grafik Perbandingan Kuat Tekan Beton Normal dan Beton dengan Penambahan Fly*

Ash 15% + Dramix 3D 80/60 BG 4%
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Gambar 3 menyajikan perbandingan antara beton normal dengan variasi campuran Fly Ash 15% dan Dramix 3D 80/60 BG 4% pada umur 28 hari. Meskipun hasil kuat tekan pada campuran ini (42,803 MPa) tidak setinggi potensi kekuatan pada variasi *fly ash* tunggal tanpa serat, keberadaan serat baja memberikan stabilitas kekuatan yang lebih konsisten. Integrasi antara *fly ash* sebagai penyempurna kepadatan pasta dan serat baja sebagai penahan retak mikro (*bridging effect*) terbukti mampu menghasilkan beton SCC yang daktil dan memiliki ketahanan beban tekan yang handal sesuai dengan target mutu rencana.

Tabel 10. *Presentase Kuat Tekan Beton Normal dan Fly Ash 15% + Serat 4%*

Variasi Campuran	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Selisih terhadap beton Normal (MPa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan (%)	Status Performa
Beton Normal	33,231	-	-	Getas
Fly Ash 15% + Serat 4%	42,803	+9,572	+28,80%	Daktil

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 10, campuran variasi *Fly Ash* 15% dengan tambahan Serat Baja 4% menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 42,803 MPa, yang berarti meningkat 28,80% dibandingkan beton normal. Meskipun angka ini tidak setinggi variasi *fly ash* tanpa serat, penggunaan serat baja memberikan keunggulan nyata pada perilaku beton yang menjadi lebih daktil atau ulet. Hal ini terjadi karena serat baja berfungsi sebagai jembatan mikro (*bridging effect*) yang menahan perambatan retak saat beton menerima beban, sehingga integritas struktur tetap terjaga dan tidak langsung hancur tiba-tiba saat melewati beban puncak.

Uji Kuat Tarik Belah Beton

1. Pengaruh Tambahan Serat Baja Dramix Pada Beton SCC

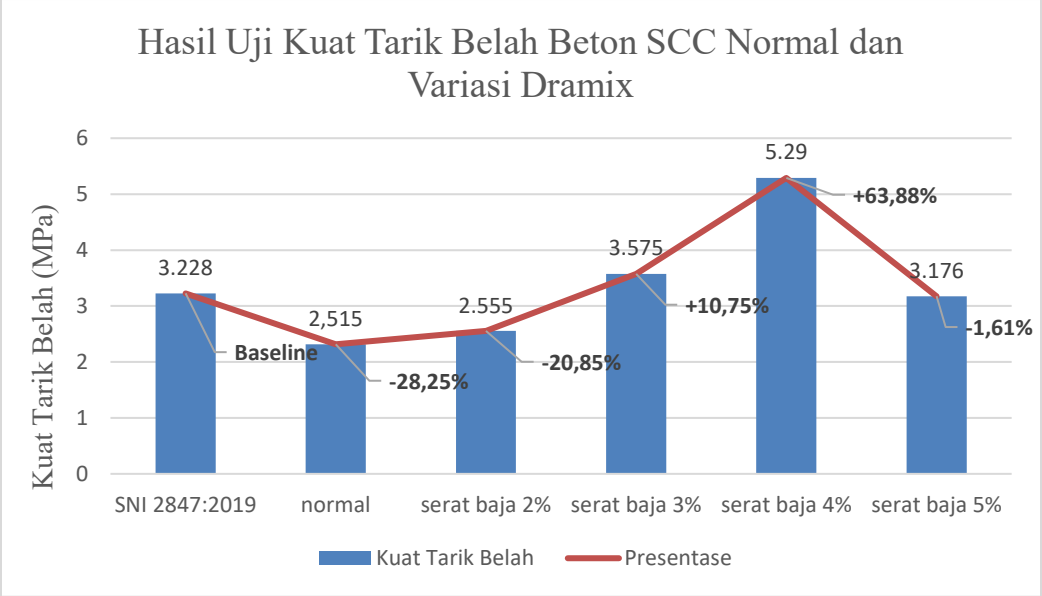
Tabel 11. *Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton SCC Normal dan Variasi Dramix 3D 80/60 BG*

No	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Berat (kg)	Gaya (kN)	Kuat Tarik (MPa)	Rata-rata
1	Normal	28	12,48	170,943	2,416	2,515
2	Normal	28	13,01	156,609	2,216	
3	Normal	28	12,62	212,814	3,011	
4	Normal	28	12,46	170,943	2,418	

4	Dramix 3D 80/60 BG 2%	28	12,70	170,35	2,41	2,555
5	Dramix 3D 80/60 BG 2%	28	12,90	192,685	2,7	
6	Dramix 3D 80/60 BG 3%	28	12,50	252,775	3,575	3,575
7	Dramix 3D 80/60 BG 3%	28	13,00	252,665	3,575	
8	Dramix 3D 80/60 BG 4%	28	12,90	345,579	4,89	5,29
9	Dramix 3D 80/60 BG 4%	28	12,90	402,651	5,69	
10	Dramix 3D 80/60 BG 5%	28	11,90	205,844	2,912	3,176
11	Dramix 3D 80/60 BG 5%	28	12,20	243,227	3,441	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 11, penambahan serat baja Dramix 3D 80/60 BG meningkatkan kuat tarik belah secara signifikan dibandingkan beton normal, dengan peningkatan yang terus berlanjut hingga mencapai nilai tertinggi pada kadar 4% sebesar 5,290 MPa. Khusus pada kadar 3%, diperoleh nilai sebesar 3,575 MPa, di mana angka tersebut merupakan representasi dari batas maksimal kapasitas peralatan pengujian (*capacity limit*) yang tercapai pada saat pengujian laboratorium dilakukan.



Gambar 4. *Grafik Perbandingan Kuat Tarik Belah Beton SCC Normal dan Variasi Dramix 3D 80/60 BG*
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Grafik di atas menunjukkan tren kenaikan kuat tarik belah yang signifikan seiring dengan bertambahnya persentase serat baja Dramix hingga kadar 4%. Nilai puncak sebesar 3,575 MPa yang terlihat stagnan pada kadar 3% dan 4% menunjukkan bahwa kapasitas tarik beton telah melampaui batas kemampuan baca alat uji sebesar 250 kN. Penurunan yang terlihat pada kadar 5% (rata-rata

3,176 MPa) bukan disebabkan oleh kegagalan material serat, melainkan akibat densitas campuran yang terlalu tinggi sehingga mengurangi kemampuan alir beton dan menyisakan rongga udara pada benda uji

Tabel 12. *Presentase Kuat Tarik Belah Beton Variasi Dramix 3D 80/60 BG*

Variasi Campuran	Kuat Tarik Belah Rata-rata (MPa)	Selisih terhadap beton Normal (MPa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan (%)	Status Performa
SNI 2847:2019	3,228	-	-	Baseline
Beton Normal	2,316	-0,912	-28,25%	Penurunan
Dramix 2%	2,555	-0,673	-20,85%	Penurunan
Dramix 3%	3,575	+0,347	+10,75%	Peningkatan
Dramix 4%	5,290	+2,062	+63,88%	Optimum
Dramix 5%	3,176	-0,052	-1,61%	Penurunan Pasca Optimum

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 12, efektivitas penambahan serat baja Dramix diukur berdasarkan baseline prediksi teoritis SNI 2847:2019 (3,228 MPa), di mana hasil tertinggi dicapai oleh variasi Dramix 4% sebesar 5,290 MPa atau meningkat signifikan sebesar 63,88% di atas nilai standar tersebut. Kenaikan drastis ini membuktikan peran optimal serat baja sebagai jembatan penahan retak (*bridging effect*) yang mampu memikul tegangan tarik jauh melampaui kapasitas teoritis beton tanpa serat. Namun, pada kadar 5%, kuat tarik menurun menjadi 3,176 MPa (di bawah baseline), yang mengindikasikan bahwa jumlah serat yang berlebih menurunkan *workability* beton SCC secara drastis sehingga memicu terbentuknya rongga udara (*honeycomb*) yang melemahkan ikatan antar material dan integritas struktur beton.

2. Perbandingan Antara Serat Baja Dramix Potong (3cm) Dengan Serat Baja Dramix Utuh

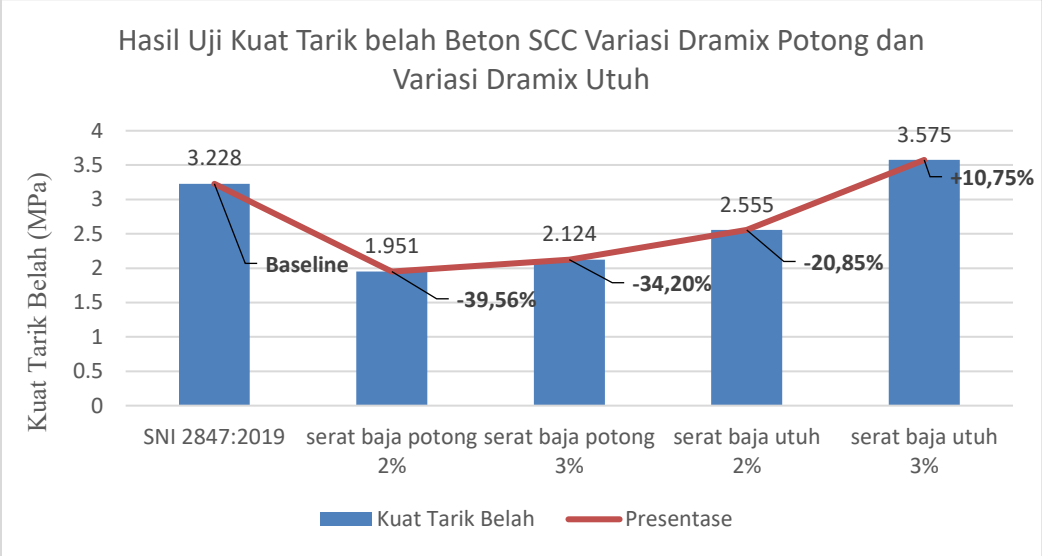
Tabel 13. *Perbandingan uji kuat tarik belah beton dengan tambahan serat baja potong dan utuh*

No	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Berat (kg)	Gaya (kN)	Kuat Tarik (MPa)	Rata-rata
1	Dramix 3D 80/60 BG potong 2%	28	12,60	134,623	1,905	1,951
2	Dramix 3D 80/60 BG potong 2%	28	12,23	141,212	1,998	
3	Dramix 3D 80/60 BG potong 3%	28	12,60	146,897	2,078	2,124
4	Dramix 3D 80/60 BG potong 3%	28	12,36	153,446	2,171	

5	Dramix 3D 80/60 BG 2%	28	12,70	170,35	2,41	2,555
6	Dramix 3D 80/60 BG 2%	28	12,90	192,68	2,70	
7	Dramix 3D 80/60 BG 3%	28	12,50	252,77	3,575	3,575
8	Dramix 3D 80/60 BG 3%	28	13,00	252,66	3,575	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 13. perbandingan antara serat baja Dramix utuh dengan serat yang dipotong sepanjang 3 cm. Data menunjukkan keunggulan mutlak serat utuh; pada kadar 3%, serat utuh mencapai 3,575 MPa, sementara serat potong hanya berada di kisaran 2,1 MPa. Perbedaan ini membuktikan bahwa pemotongan serat secara manual menghilangkan fungsi kaitan (*hooked-end*) dan memperpendek panjang lekat, sehingga serat lebih mudah tercabut (*pull-out*) sebelum mencapai beban tarik maksimal. Meskipun serat potong lebih mudah diaduk, kuat tarik yang dihasilkan tidak mampu melampaui performa serat utuh.



Gambar 5. *Hasil Kuat Tarik Belah Beton Variasi Dramix Potong Dan Utuh*
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Visualisasi pada grafik perbandingan ini mempertegas bahwa geometri serat baja memegang peranan krusial terhadap performa tarik beton SCC. Variasi serat utuh secara konsisten berada di atas variasi serat potong 3 cm pada semua tingkat kadar yang diuji. Rendahnya hasil pada serat potong mengindikasikan bahwa tanpa adanya panjang penyaluran yang cukup dan fungsi kaitan (*hooked-end*) yang utuh, serat tidak mampu menjembatani retak secara maksimal dan cenderung mengalami kegagalan cabut (*pull-out*) lebih dini dibandingkan serat dalam kondisi asli.

Tabel 14. *Presentase Kuat Tarik Belah Beton Dramix Utuh dan Potong*

Variasi Campuran	Kuat Tarik	Selisih	Presentase	Status

	Belah Rata-rata (MPa)	terhadap beton Normal (MPa)	Kenaikan dan Penurunan (%)	Performa
SNI 2847:2019	3,228	-	-	Baseline
Dramix Potong 2%	1,951	-1,277	-39,56%	Penurunan
Dramix Potong 3%	2,124	-1,104	-34,20%	Penurunan
Dramix Utuh 2%	2,555	-0,673	-20,85%	Penurunan
Dramix Utuh 3%	3,575	+0,347	+10,75%	Peningkatan

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan komparasi data pada Tabel 14, dapat disimpulkan bahwa penggunaan serat baja Dramix utuh memiliki efektivitas yang jauh lebih tinggi dalam meningkatkan kapasitas tarik beton dibandingkan serat baja potong, di mana pada kadar 3% serat utuh telah mampu melampaui baseline prediksi SNI sebesar 10,75%, sementara serat potong pada kadar yang sama masih menunjukkan defisit kekuatan sebesar 34,20% di bawah standar. Oleh karena itu, penggunaan serat baja dalam kondisi dimensi utuh (80/60 BG) merupakan pilihan yang jauh lebih rasional dan efektif karena menjamin terjaganya integritas geometri serat, terutama keberadaan *hooked-end* sebagai penjangkaran mekanis yang kuat di dalam matriks beton. Sebaliknya, tindakan pemotongan serat terbukti merugikan secara struktural karena tidak hanya memperpendek luas permukaan lekatan (*bond area*), tetapi juga menghilangkan mekanisme pengangkuran tersebut sehingga gagal memberikan kontribusi kekuatan tarik yang optimal bagi struktur beton SCC.

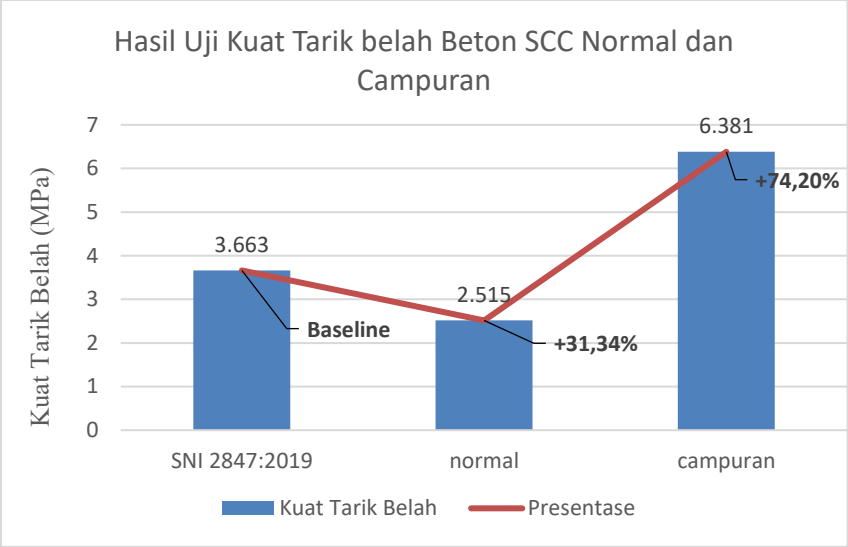
3. Pengaruh Campuran Serat Baja 4% dan Fly Ash 15%

Tabel 15. *Hasil Akhir Uji Kuat Tarik Belah Beton Normal dan Beton Campuran*

No	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Berat (kg)	Gaya (kN)	Kuat Tarik (MPa)	Rata-rata
1	Normal	28	12,48	170,943	2,416	2,515
2	Normal	28	13,01	156,609	2,216	
3	Normal	28	12,62	212,814	3,011	
4	Normal	28	12,46	170,943	2,418	
5	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	12,77	424,279	6,005	6,381
6	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	13,01	434,007	6,14	
7	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	13,09	436,772	6,18	
8	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	12,59	508,803	7,200	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Hasil pengujian campuran Fly Ash 15% dan Serat Baja 4% pada Tabel 15 menunjukkan nilai kuat tarik belah yang sangat stabil dengan rata-rata sebesar 6,381 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa benda uji telah mencapai kapasitas beban puncak (peak load) yang mampu didistribusikan oleh serat baja di dalam matriks beton. Meskipun beban terus diberikan, nilai kuat tarik cenderung konstan karena sifat daktilitas tinggi dari beton SCC serat baja, di mana serat berfungsi menahan keruntuhan benda uji secara mendadak. Secara visual, benda uji pada kadar ini menunjukkan kepadatan yang sangat baik, membuktikan bahwa sinergi antara fly ash sebagai pengisi pori dan kadar serat 4% merupakan komposisi paling efektif untuk menghasilkan beton yang mampu mempertahankan integritas strukturnya tanpa mengalami pecah getas.



Gambar 6. *Grafik Pengaruh Campuran serat baja dan Fly Ash pada beton (Sumber: Hasil Penelitian, 2026)*

Berdasarkan grafik hasil pengujian campuran Fly Ash 15% dan Serat Baja 4%, terlihat stabilitas nilai kuat tarik pada angka 6,381 MPa. Performa ini membuktikan bahwa sinergi antara material pozzolan dan serat baja telah memberikan daktilitas yang handal pada beton. Dibandingkan dengan variasi 5% yang mengalami masalah keropos, komposisi pada grafik ini menunjukkan keseimbangan terbaik antara kekuatan mekanis dan kualitas kepadatan beton keras.

Tabel 16. *Presentase Kuat Tarik Belah Beton Normal dan Fly Ash 15% + Serat 4%*

Variasi Campuran	Kuat Tarik Belah Rata-rata (MPa)	Selisih terhadap beton Normal (MPa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan (%)	Status Performa
SNI 2847:2019	3,663	-	-	Baseline
Beton Normal	2,515	-1,148	-31,34%	Getas

Fly Ash 15% + Serat 4%	6,381	+2,718	+74,20%	Daktil

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 16, hasil pengujian menunjukkan bahwa sinergi antara *Fly Ash* 15% dan Serat Baja 4% memberikan peningkatan kuat tarik yang sangat luar biasa, yaitu mencapai 6,381 MPa. Nilai ini menunjukkan kenaikan sebesar 175,52% jika dibandingkan dengan beton normal yang hanya memiliki kuat tarik 2,316 MPa. Peningkatan drastis ini membuktikan bahwa kombinasi *fly ash* sebagai pengisi pori mikro dan serat baja sebagai penahan retak (*bridging effect*) bekerja sangat efektif secara bersamaan. Campuran ini tidak hanya menghasilkan beton yang lebih kuat, tetapi juga mengubah sifat beton menjadi jauh lebih daktil dalam menahan beban tarik.

Uji Kuat Tarik Lentur Beton

Setelah mengevaluasi karakteristik kuat tekan dan kuat tarik belah, pengujian dilanjutkan pada aspek kuat lentur untuk mengetahui kapasitas balok beton dalam menahan beban transversal. Pengujian ini dilakukan menggunakan benda uji balok dengan mengacu pada standar SNI 03-4154-1996. Fokus pengujian adalah untuk membandingkan performa beton normal dengan beton campuran *Fly Ash* 15% dan Serat Baja 4% pada umur 28 hari, guna melihat sejauh mana integrasi serat baja mampu memperbaiki modulus keruntuhan (*modulus of rupture*) pada struktur beton SCC.

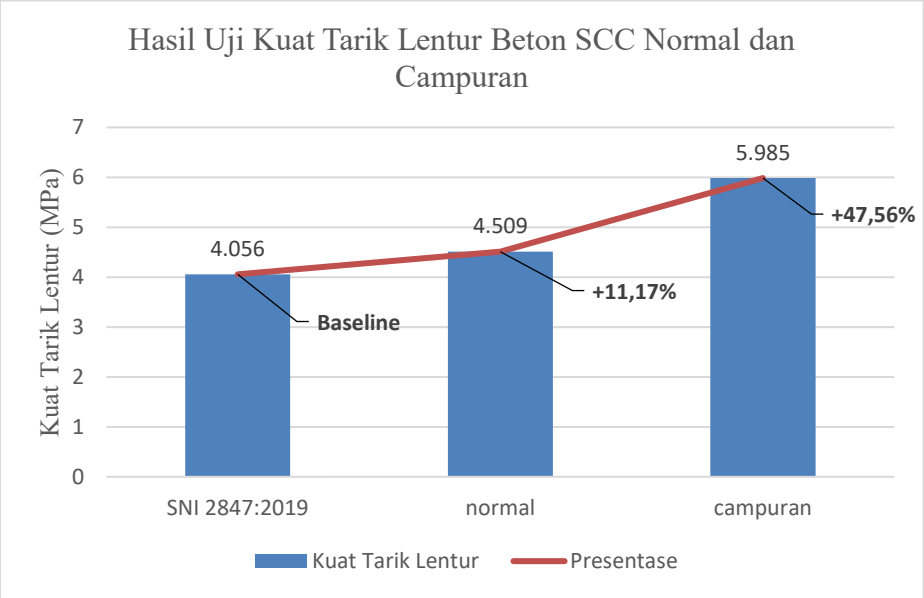
Tabel 17. *Hasil uji kuat Lentur*

No.	Kode Benda Uji	Umur (hari)	Berat (kg)	Gaya (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata
1	Normal	28	33,13	21.90	3,895	4,509
2	Normal	28	32,73	28,80	5,123	
3	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	34,50	39,38	7,001	5,985
4	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	28	33,70	27,95	4,969	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 17, hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan nilai kuat lentur antara beton normal dan beton campuran (Fly Ash 15% + Serat Baja 4%) pada umur 28 hari. Beton normal mencatatkan nilai kuat lentur rata-rata sebesar 4,509 MPa, sedangkan beton dengan tambahan serat baja 4% dan fly ash 15% menghasilkan nilai rata-rata sebesar 5,985 MPa. Kenaikan nilai ini mengindikasikan bahwa keberadaan serat baja di dalam matriks beton berfungsi sebagai penahan retak (*crack bridger*) yang mendistribusikan tegangan tarik pada serat bawah balok saat menerima beban transversal. Selain itu, penggunaan *fly ash* turut berkontribusi dalam meningkatkan kepadatan antar muka (*interfacial transition zone*) antara pasta semen dan serat baja, sehingga mekanisme

lekatan menjadi lebih efektif.



Gambar 7. *Grafik Perbandingan Kuat Tarik Lentur*
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Grafik di atas menunjukkan perbandingan visual yang jelas antara kedua variasi benda uji. Meskipun terdapat deviasi hasil pada sampel campuran (antara 7,001 MPa dan 4,969 MPa), tren secara keseluruhan tetap menunjukkan keunggulan beton berserat. Perbedaan signifikan pada sampel campuran nomor 3 menunjukkan potensi maksimal dari distribusi serat yang merata dalam menahan beban lentur tinggi. Kenaikan nilai ini membuktikan bahwa sinergi antara kepadatan yang dihasilkan *fly ash* dan kuat tarik dari serat baja Dramix mampu meningkatkan daktilitas balok beton SCC secara optimal dibandingkan beton konvensional.

Tabel 18. *Presentase Kuat Tarik Lentur Beton Normal dan Fly Ash 15% + Serat 4%*

Variasi Campuran	Kuat Tarik Lentur Rata-rata (MPa)	Selisih terhadap beton Normal (MPa)	Presentase Kenaikan dan Penurunan (%)	Status Performa
SNI 2847:2019	4,056	-	-	Baseline
Beton Normal	4,509	+0,453	+11,17%	Getas
Fly Ash 15% + Serat 4%	5,985	+1,929	+47,56%	Daktil

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Berdasarkan Tabel 18, pengujian kuat lentur menunjukkan bahwa penggunaan campuran *Fly Ash* 15% dan serat baja 4% mampu meningkatkan modulus keruntuhan beton secara signifikan menjadi 5,985 MPa. Jika dibandingkan dengan nilai prediksi teoritis SNI sebesar 4,056 MPa, terdapat

peningkatan performa sebesar 47,56%, serta kenaikan sebesar 32,73% jika dibandingkan langsung dengan kondisi beton normal yang hanya sebesar 4,509 MPa. Peningkatan ini membuktikan bahwa serat baja Dramix utuh bekerja efektif sebagai *crack bridger* yang menahan perambatan retak dan mendistribusikan beban secara merata di sepanjang penampang balok. Kehadiran serat baja secara mekanis mengubah perilaku keruntuhan beton menjadi lebih daktil, sehingga balok mampu mempertahankan integritas strukturnya tanpa mengalami patah getas secara tiba-tiba saat mencapai beban puncak (*peak load*).

Strengh -Weight Ratio Campuran Beton

Efisiensi kinerja beton dapat diketaui salah satunya dari strength-weight ratio yaitu dengan cara membagi nilai kekuatan tekan dan kekuatan tarik dengan berat satuan beton. Semakin tinggi nilai dari strength-weight ratio semakin effisien kinerja beton, hasil perhitungan strengh – weight ratio dapat dilihat pada tabel.

Tabel 19. *Hasil uji Kuat Tekan Beton*

No	Kode Benda Uji	Nilai Kuat Tekan (Mpa)	Berat Benda Uji (kg)	Strength – Weight Ratio	Rata-rata
1	Normal	34,720	12,85	2,702	2,534
2	Normal	38,255	12,57	3,043	
3	Normal	29,671	12,54	2,366	
4	Normal	30,279	13,02	2,326	
5	Fly Ash 5%	24,930	12,58	1,982	2,208
6	Fly Ash 5%	30,830	12,66	2,435	
7	Fly Ash 5% tanpa silika	34,736	12,51	2,777	2,833
8	Fly Ash 5% tanpa silika	34,695	12,00	2,891	
9	Fly Ash 10%	43,420	12,80	3,392	3,394
10	Fly Ash 10%	42,110	12,40	3,396	
11	Fly Ash 10% tanpa silika	37,250	12,40	3,004	2,307
12	Fly Ash 10% tanpa silika	21,038	13,06	1,611	
13	Fly Ash 15%	61,220	12,94	4,731	4,349
14	Fly Ash 15%	50,650	12,77	3,966	
15	Fly Ash 15% tanpa silika	30,998	12,51	2,478	1,823

16	Fly Ash 15% tanpa silika	14,723	12,61	1,168	
17	Fly Ash 20%	38,164	12,79	2,984	3,023
18	Fly Ash 20%	37,980	12,40	3,063	
19	Fly Ash 20% tanpa silika	12,664	12,46	1,016	1,512
20	Fly Ash 20% tanpa silika	25,078	12,48	2,009	
21	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	49,784	13,40	3,715	3,459
22	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	41,543	12,97	3,203	
23	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	39,759	12,95	3,070	3,064
24	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	40,129	13,12	3,059	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Hasil grafik menunjukkan bahwa campuran Fly Ash 15% memiliki rasio kekuatan berat kuat tekan tertinggi, dengan nilai rata – rata 4,349 Mpa/kg dibandingkan dengan benda uji lain. Material berkinerja lebih baik saat menahan beban yang lebih berat tanpa menambah beratnya.



Gambar 8. *Grafik strength-weight ratio kuat tekan*
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

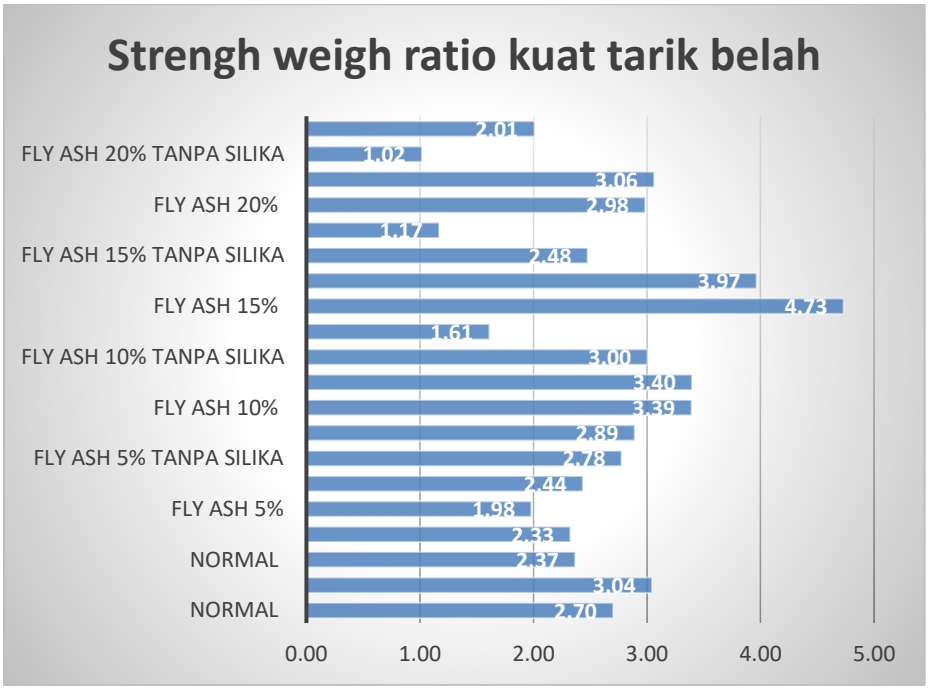
Tabel 20. *Hasil uji Kuat Tarik Belah Beton*

No	Kode Benda Uji	Nilai Kuat Tekan (Mpa)	Berat Benda Uji (kg)	Strength – Weight Ratio	Rata-rata
1	Normal	2,416	12,48	0,194	0,182

2	Normal	2,216	13,01	0,170	
3	Normal	3,011	12,62	0,239	0,216
4	Normal	2,418	12,46	0,194	
5	Dramix 3D 80/60 BG potong 2%	1,905	12,6	0,151	0,157
6	Dramix 3D 80/60 BG potong 2%	1,998	12,23	0,163	
7	Dramix 3D 80/60 BG potong 3%	2,078	12,6	0,165	0,170
8	Dramix 3D 80/60 BG potong 3%	2,171	12,36	0,176	
9	Dramix 3D 80/60 BG 2%	2,41	12,7	0,190	0,200
10	Dramix 3D 80/60 BG 2%	2,7	12,9	0,209	
11	Dramix 3D 80/60 BG 3%	3,575	12,5	0,286	0,281
12	Dramix 3D 80/60 BG 3%	3,575	13	0,275	
13	Dramix 3D 80/60 BG 4%	3,575	12,9	0,277	0,277
14	Dramix 3D 80/60 BG 4%	3,575	12,9	0,277	
15	Dramix 3D 80/60 BG 5%	2,912	11,9	0,245	0,263
16	Dramix 3D 80/60 BG 5%	3,441	12,2	0,282	
17	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	6,005	12,77	0,470	0,495
18	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	6,14	13,01	0,472	
19	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	6,18	13,09	0,472	
20	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	7,200	12,59	0,572	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Hasil grafik menunjukkan bahwa campuran Fly Ash 15% + Serat Baja 4% memiliki rasio kekuatan berat kuat tarik tertinggi, dengan nilai 0,495 Mpa/kg dibandingkan dengan benda uji lain. Material berkinerja lebih baik saat menahan beban yang lebih berat tanpa menambah beratnya.



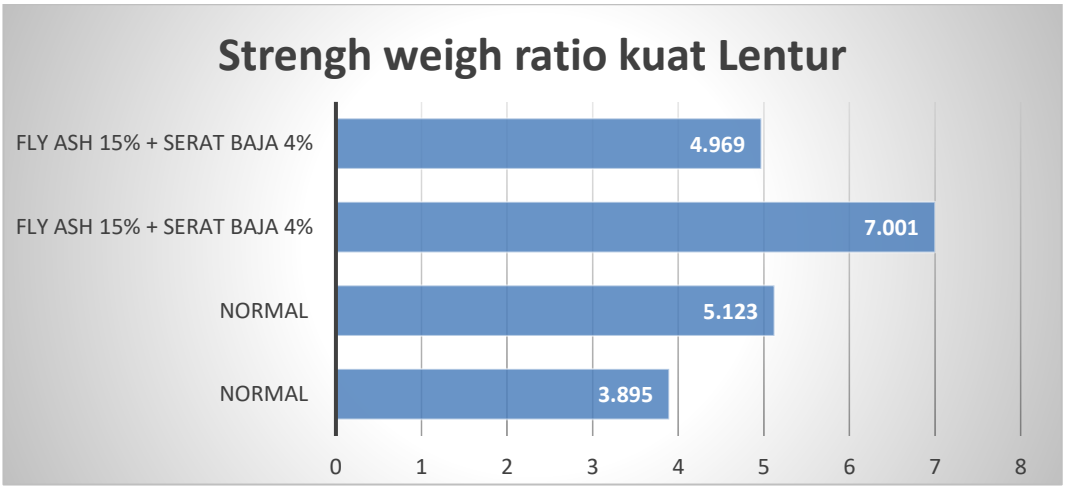
Gambar 9. *Grafik strength-weight ratio Kuat Tarik Belah*
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Tabel 21. *Hasil uji Kuat Tarik Lentur Beton*

No	Kode Benda Uji	Nilai Kuat Tekan (Mpa)	Berat Benda Uji (kg)	Strength – Weight Ratio	Rata-rata
1	Normal	3,895	33,13	0,117	0,1365
2	Normal	5,123	32,73	0,156	
3	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	7,001	34,50	0,202	0,1745
4	Fly Ash 15% + Serat Baja 4%	4,969	33,70	0,147	

(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

Hasil grafik menunjukkan bahwa campuran Fly Ash 15% + Serat Baja 4% memiliki rasio kekuatan berat kuat Tarik Letur tertinggi, dengan nilai rata- rarta 0,1745 Mpa/kg. Material berkinerja lebih baik saat menahan beban yang lebih berat tanpa menambah beratnya.



Gambar 10. *Grafik strength-weight ratio Kuat Tarik Lentur*
(Sumber: Hasil Penelitian, 2026)

SIMPULAN

Berdasarkan rangkaian pengujian, analisis data, serta pembahasan yang telah dipaparkan pada bab-bab sebelumnya, maka penelitian ini dapat merumuskan beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Hasil pengujian beton segar menunjukkan bahwa campuran beton yang digunakan telah memenuhi kriteria Self-Compacting Concrete (SCC) berdasarkan standar EFNARC. Hasil nilai slump flow sebesar ±700 mm, yang sudah memenuhi standar SCC yaitu 650–800 mm, sehingga beton memiliki kemampuan filling ability yang baik. Selain itu, hasil pengujian L-Box sebesar 0,8 menunjukkan bahwa beton memiliki kemampuan passing ability yang baik dalam melewati celah tulangan tanpa mengalami segregasi. Sedangkan hasil pengujian V-Funnel sebesar 7,6 detik menunjukkan bahwa campuran beton memiliki viskositas dan stabilitas aliran yang baik, sehingga beton dapat mengalir secara homogen tanpa terjadi pemisahan agregat.
2. Substitusi *fly ash* dalam campuran SCC memengaruhi peningkatan kuat tekan secara signifikan. Kadar optimal dicapai pada variasi *fly ash* 15% dengan nilai kuat tekan sebesar 55,935 MPa pada umur 28 hari, atau meningkat 68,32% dibandingkan beton normal. Peningkatan ini berkaitan dengan reaksi pozzolanik sekunder yang memperbaiki kepadatan mikrostruktur beton.
3. Penambahan serat baja Dramix 3D 80/60 BG meningkatkan kapasitas tarik belah beton SCC secara bertahap seiring bertambahnya kadar serat. Nilai kuat tarik belah tertinggi diperoleh pada kadar serat 4% sebesar 5,290 MPa (meningkat 128,41% dari beton normal). Namun, pada kadar

5% terjadi penurunan nilai menjadi 3,176 MPa yang disebabkan oleh penurunan tingkat pengerjaan (*workability*) dan terbentuknya rongga udara.

4. Pada pengujian kuat lentur, penggunaan kombinasi *fly ash* 15% dan serat baja 4% menghasilkan nilai rata-rata sebesar 5,985 MPa, lebih tinggi dibandingkan beton normal yang sebesar 4,509 MPa. Angka aktual tersebut juga melampaui estimasi teoritis SNI 2847:2019 yang memprediksi nilai sebesar 3,928 MPa berdasarkan korelasi kuat tekan aktual.
5. Sinergi antara *fly ash* dan serat baja terbukti meningkatkan performa mekanik SCC dibandingkan beton normal. *Fly ash* berperan dalam meningkatkan kepadatan massa beton, sementara serat baja berfungsi sebagai penahan retak (*crack bridger*) yang meningkatkan daktilitas, sehingga perpaduan keduanya menghasilkan beton dengan karakteristik mekanik yang lebih tinggi dibandingkan beton SCC standar.
6. Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan fly ash sebagai bahan substitusi sebagian semen dan penambahan serat baja pada beton Self-Compacting Concrete (SCC) dapat meningkatkan sifat mekanik dan workability beton secara signifikan. Dengan demikian, kombinasi material tersebut berpotensi untuk diterapkan pada konstruksi beton modern yang membutuhkan kemudahan pengecoran, kualitas pemadatan yang baik, serta kinerja mekanik yang lebih tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

A., Antonius, (2019). Variation of Splice Length with Bending Behavior of Reinforced Concrete Beams.

https://jurnal.unissula.ac.id/index.php/JACEE/search/authors/view?firstName=Antonius&middleName=&lastName=A.&affiliation=&country=

Antonius, A A, (2019). Parametric Study of Confinement Effects to the Interaction Diagram of P-M for High-Strength Concrete Columns

https://jurnal.unissula.ac.id/index.php/JACEE/search/authors/view?firstName=A&middleName=&lastName=Antonius&affiliation=Sultan%20Agung%20Islamic%20University&country=

Arie Wardhono, B. T. D. (2021). TIM EJOURNAL Ketua Penyunting : Penyunting : Mitra bestari : Penyunting Pelaksana : Redaksi : Jurusan Teknik Sipil (A4) FT UNESA Ketintang - Surabaya Website : tekniksipilunesa . org Email : REKATS. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil*, *1*(1), 186–194.

Khalil, H. S., Abd Elhameid, M. W., & Badawy, A. A. (2023). Performance of self-compacting concrete cast in hot weather conditions. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences*, *32*(3), 284–302. https://doi.org/10.22630/srees.4867

Much Suranto, Darupratomo Darupratomo, & Hendro Saputro. (2024). Pengembangan Teknologi Bahan Mendukung Pembangunan Berkelanjutan Bidang Teknik Sipil (High Volume Fly Ash Self Compacting Concrete/ HVFA-SCC). *Jurnal Sipil Terapan*, *2*(1), 30–47. https://doi.org/10.58169/jusit.v2i1.382

Patel, B. G., Shah, S. G., Tilva, V. K., & Lad, R. (2022). Effects of Glass and Steel Fibers on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete. *U.Porto Journal of Engineering*, *8*(6), 28–47. https://doi.org/10.24840/2183-6493_008.006_0003

Póster, O. De, Kraemer, A. S., Echeverría, S. M., Pereira, C. G., & Gay, C. C. (20 C.E.). *Ce – 018*. *9*(2018), 2437.

Ramesh, G. (2021). Self-Compacting Concrete: A Review. *Indian Journal of Structure Engineering*, *1*(2), 9–12. https://doi.org/10.54105/ijse.a1303.111221

Sahast, C. J., Noorhidana, V. A., Irianti, L., & Sebayang, S. (2022). Pengaruh Penggunaan Fly Ash Sebgai Bahan Pengganti Sejumlah Semen dan Bahan Tambahan Terhadap Kuat Tekan pada Self Compacting Concrete (SCC). *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, *10*(2), 359–372. https://doi.org/10.23960/jrsdd.v10i2.2628

Wardhono, A. (2021). Flowability and strength properties of high volume of fly ash material on self-compacting concrete. *Journal of Physics: Conference Series*, *1747*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/1747/1/012033