

PENGARUH SERAT BAJA TERHADAP TEGANGAN SISA SCC PASCA PEMBAKARAN

Philipus Hermawan¹, Widodo Kushartomo^{1*}, dan Louis Sutomo Limbo¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

*widodo@untar.ac.id

Masuk: 29-05-2026, revisi: 06-07-2026, diterima untuk diterbitkan: 31-07-2026

ABSTRACT

High-rise building infrastructure requires high-strength Self-Compacting Concrete (SCC). This material supports Sustainable Development Goal (SDG) 11 to create safe and disaster-resilient cities. However, a 600°C temperature triggers concrete strength degradation due to chemical decomposition and aggregate expansion. This study evaluates the effect of 3D hooked-end steel fibers (aspect ratio 65, length 35 mm) at 0%, 0.5%, 1%, and 1.5% variations on concrete workability and post-fire residual strength. The research uses a laboratory experimental method. Test specimens include 100x200 mm cylinders and 100x100x400 mm beams. Researchers cured the samples in water for 28 days before mechanical testing. Researchers then heated the samples at 600°C for 2 hours. Test results show the 1.5% fiber addition decreased slump flow from 670 mm to 595 mm. At normal temperature, compressive strength increased from 40.58 MPa (0%) to 47.77 MPa (1.5%). Flexural strength rose from 5.83 MPa (0%) to 9.50 MPa (1.5%). After the 600°C fire exposure, the concrete degraded. Residual compressive strength dropped to 44.46% (0%) and 59.41% (1.5%). Residual flexural strength dropped to 18.64% (0%) and 62.40% (1.5%). Adding steel fibers to SCC minimizes the negative impacts of high-temperature exposure compared to unreinforced SCC.

Keywords: self-compacting concrete; steel fiber; residual compressive strength; residual flexural strength; SDG 11

ABSTRAK

Infrastruktur gedung tinggi membutuhkan *Self-Compacting Concrete* (SCC) mutu tinggi, sejalan dengan *Sustainable Development Goals* (SDGs) 11 untuk mewujudkan kota tahan bencana. Namun, suhu 600°C memicu degradasi kekuatan beton akibat dekomposisi kimia dan pemuai agregat. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh serat baja *hooked-end* 3D (rasio 65, panjang 35 mm) dengan variasi 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5% terhadap workabilitas dan kekuatan sisa beton pascabakar. Metode penelitian menggunakan eksperimen laboratorium. Benda uji terdiri dari silinder (100x200 mm) dan balok (100x100x400 mm). Sampel dirawat di dalam air selama 28 hari sebelum pengujian mekanis. Sampel lalu dibakar pada suhu 600°C dan ditahan selama 2 jam. Hasil uji menunjukkan penambahan serat 1,5% menurunkan *slump flow* dari 670 mm menjadi 595 mm. Pada suhu normal, terjadi peningkatan kuat tekan dari 40,58 MPa (kadar 0%) menjadi 47,77 MPa (kadar 1,5%). Kuat lentur naik dari 5,83 MPa (kadar 0%) menjadi 9,50 MPa (kadar 1,5%). Pasca pembakaran 600°C, beton mengalami degradasi mutu. Kuat tekan sisa SCC turun menjadi 44,46% (kadar 0%) dan 59,41% (kadar 1,5%). Kuat lentur sisa turun menjadi 18,64% (kadar 0%) dan 62,40% (kadar 1,5%). Penambahan serat baja pada SCC dapat meminimalisir dampak negatif yang disebabkan oleh paparan suhu tinggi daripada SCC yang tidak berpenguat serat baja.

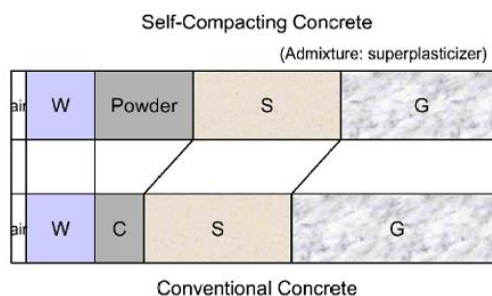
Kata kunci: Beton memadat sendiri; serat baja; kuat tekan sisa; kuat lentur sisa; SDG 11

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan infrastruktur gedung tinggi di Indonesia meningkatkan kebutuhan material konstruksi unggulan. Industri konstruksi menggunakan *Self-Compacting Concrete* (SCC) bermutu tinggi sebagai salah satu solusi untuk menjawab kebutuhan material struktural yang kuat dan efisien. Material SCC memiliki kemampuan mengalir dan memadatkan diri sendiri. Pekerja konstruksi tidak memerlukan vibrator mekanis saat melakukan pengecoran area tulangan yang sangat rapat. Karakteristik ini menghemat waktu kerja konstruksi dan mengurangi paparan getaran mekanis yang membahayakan pekerja (Ahmad et al., 2023).

Prinsip dasar desain SCC yaitu SCC harus memiliki viskositas cukup tinggi untuk mempertahankan homogenitas campuran selama transportasi dan penempatan, namun *yield stress* yang sangat rendah agar dapat mengalir tanpa hambatan signifikan (EFNARC, 2005). Keseimbangan ini dicapai melalui tiga strategi utama, yaitu pertama limitasi ukuran agregat kasar maksimum, yang umumnya 20 mm atau lebih kecil untuk mengurangi *blocking*, kedua peningkatan volume pasta untuk meningkatkan kohesi seperti ilustrasi campuran SCC pada Gambar 1. Ketiga

penggunaan *Superplasticizer* dosis tinggi berbasis *polycarboxylate ether* untuk menurunkan *yield stress* tanpa menambah air (Ahmad et al., 2023).



Gambar 1. Perbandingan proporsi campuran antara *self-compacting concrete* dan beton konvensional (Okamura & Ouchi, 2003)

Bangunan gedung tinggi memiliki risiko kebakaran yang mengancam keselamatan struktur utamanya. Paparan suhu tinggi akibat kebakaran mendegradasi material beton secara bertahap. Air bebas di dalam pori beton menguap pada suhu 200°C dan menurunkan kuat tekan hingga tersisa 80% (Lee et al., 2009). Paparan suhu 200°C hingga 400°C memicu risiko *explosive spalling*. Tekanan uap air yang terperangkap di dalam struktur mikro beton memuai dengan sangat cepat dan meledakkan permukaan material secara tiba-tiba (Kushartomo et al., 2025).

Kerusakan struktur beton memasuki fase sangat kritis saat suhu melampaui 500°C. Pasta semen mengalami dekomposisi kalsium hidroksida secara masif pada titik suhu 530°C. Proses dekomposisi ini memicu penyusutan volume matriks pengikat beton (Hager, 2013). Suhu 600°C memicu transformasi fase agregat silika dari *alpha-quartz* menjadi *beta-quartz* pada titik pasti 573°C. Perubahan fase kimia ini mengembangkan volume agregat secara mendadak. Fenomena tarik-menarik antara penyusutan pasta semen dan pemuaian agregat menciptakan ketidakcocokan termal yang sangat ekstrem di dalam material. Tegangan internal beton meningkat tajam dan menyebarkan retak mikro secara masif ke seluruh penampang. Kuat tekan sisa beton turun secara drastis setelah melewati ambang batas suhu 600°C (Lee et al., 2009).

Penambahan serat baja (*steel fiber*) menjadi solusi masalah degradasi beton pasca insiden kebakaran. Serat baja berfungsi sebagai penguat internal yang meningkatkan kekuatan tarik dan daktilitas beton (Ahmad et al., 2023). Rangkaian serat secara efektif menjembatani retak dan mendistribusikan tegangan secara merata ke seluruh matriks beton. Mekanisme ini mencegah konsentrasi tegangan pada satu titik sehingga beton mampu menahan beban lentur yang jauh lebih besar (Suryana & Kushartomo, 2025). Penggunaan serat baja terbukti efisien mencegah *spalling* dan mempertahankan kapasitas mekanis beton pasca paparan suhu api yang tinggi (Zhang et al., 2020).

Penerapan material serat baja pada beton SCC menghadirkan tantangan teknis yang cukup kompleks. Volume serat baja yang terlalu tinggi merusak karakteristik fundamental SCC. Penambahan serat dalam kuantitas besar memicu penggumpalan material dan menurunkan kemampuan alir beton secara drastis. Beton SCC kehilangan kepadatan strukturalnya dan membentuk ruang keropos sebelum kebakaran terjadi (Liu et al., 2025). Selain untuk mendapatkan data pengaruh kadar serat terhadap SCC, penelitian ini juga penting untuk mendapatkan Basis data empiris yang akurat memastikan keamanan tindakan perkuatan struktur (*retrofitting*) atau pembongkaran total (*demolish*) pada bangunan pasca kebakaran.

Penelitian ini merumuskan tiga permasalahan utama terkait penggunaan serat baja pada *Self-Compacting Concrete* (SCC). Permasalahan pertama mengkaji seberapa besar volume serat baja memengaruhi tingkat *workability* pada beton segar SCC. Selanjutnya, penelitian ini mempertanyakan seberapa besar pengaruh penambahan volume serat baja tersebut terhadap nilai kuat tekan dan kuat lentur SCC. Terakhir, permasalahan ini difokuskan pada seberapa besar pengaruh volume serat baja terhadap retensi nilai kuat tekan sisa dan kuat lentur sisa SCC pasca paparan pembakaran.

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengukur secara empiris besarnya pengaruh variasi volume serat baja terhadap *workability* beton segar SCC. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengukur besarnya pengaruh variasi volume serat tersebut terhadap nilai kuat tekan dan kuat lentur SCC. Terakhir, tujuan penelitian ini difokuskan untuk mengukur secara pasti besarnya pengaruh variasi volume serat baja terhadap nilai kuat tekan sisa dan kuat lentur sisa SCC pasca pembakaran.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental di laboratorium beton Universitas Tarumanegara Jakarta Barat. Metode eksperimental laboratorium ini menguji ketahanan mekanis beton SCC setelah melewati proses pembakaran. Fokus penelitian terletak pada penggunaan serat baja sebagai parameter utama. Kadar serat baja bervariasi antara 0%, 0,5%, 1%, hingga 1,5% dari volume beton. Peneliti kemudian mengamati parameter pengujian yang meliputi kuat tekan dan kuat lentur sampel yang dites pada kondisi normal serta kuat tekan sisa dan kuat lentur sisa pasca pembakaran. Seluruh pengujian menerapkan parameter tetap demi menjaga validitas hasil. Faktor yang dibuat konstan adalah *mix design* SCC, suhu pembakaran 600°C, durasi pembakaran, dan metode pendinginan. Kondisi beton normal tanpa perlakuan pembakaran menjadi standar pembandingan dalam penelitian ini.

Tahapan penelitian

- Pengujian material dan bahan.
Sebelum pembuatan benda uji, material seperti agregat kasar, agregat halus, dan semen diuji terlebih dahulu. Tujuannya memastikan material memenuhi standar dan layak digunakan.
- *Mix design* SCC
Mix design mengacu pada metode EFNARC (*European Federation of National Associations Representing for Concrete*). Tabel 1 merupakan *Mix design* yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1. Tabel *Mix design* beton

Parameter	Nilai
Kuat Tekan Rencana (f _c)	40 MPa
<i>Slump Flow</i>	SF2 (660–750 mm)
Air	165 kg/m ³
<i>Fly Ash</i>	50 kg
Kadar Semen	450 kg/m ³
Berat Agregat Kasar	936 kg/m ³
Berat Agregat Halus	763,51 kg/m ³

- Pembuatan benda uji
Benda uji yang akan digunakan adalah berbentuk silinder memiliki diameter 100 mm dan tinggi 200 mm, sedangkan benda uji balok berukuran 400 mm x 100 mm x 100 mm. Penelitian ini mengintegrasikan data dari penelitian sendiri dan data referensi eksperimental untuk memperluas cakupan analisis. Sampel beton normal dengan kadar serat 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5% serta sampel pasca bakar 600°C dengan kadar serat 0%, 0,5%, 1%, dan 1,5% dimana data kandungan serat baja 1% merupakan data referensi. Data tersebut berasal dari penelitian Limbo et al. (2026) yang menggunakan *mix design* dan parameter tetap yang sama. Tabel 2 merupakan rincian jumlah sampel dan sumbernya untuk penelitian ini.

Tabel 2. Tabel total sampel beton

Kondisi	Kadar serat	Jumlah sampel	
		Silinder	Balok
Normal (25°C)	0%	3	3
	0,50%	3	3
	1% *	3	3
	1,50%	3	3
Bakar (600°C)	0%	3	3
	0,50%	3	3
	1%*	3	3
	1,50%	3	3
Total		24	24

*Data Limbo et al. (2026)

- Perawatan benda uji
Setelah proses pencetakan benda uji, perawatan dilakukan dengan pendiaman benda uji di dalam cetakan selama 24 jam pada suhu ruang. Setelah 24 jam, lepaskan cetakan lalu beri tanda identifikasi pada setiap spesimen. Langkah berikutnya adalah merendam benda uji di dalam air (*water curing*) selama 28 hari. Terakhir, angkat dan keringkan benda uji pada suhu ruang sebelum memulai pengujian.
- Pengujian benda uji
 - Pembakaran

Proses pembakaran menggunakan alat tungku di laboratorium. Benda uji dibakar pada suhu 600°C yang akan ditahan selama 2 jam. Pendinginan benda uji secara alami di dalam tungku hingga kembali ke suhu ruang setelah proses pembakaran selesai.

- o Kuat tekan dan kuat lentur

Pengujian kuat tekan mengacu pada SNI 1974:2011 dengan menggunakan silinder 100×200 mm. Pengujian kuat lentur mengacu pada SNI 4431:2011 dengan menggunakan balok 100×100×400 mm.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 3. Tabel *slump flow* beton

Variasi serat baja	<i>Slump flow</i> rata-rata (mm)
0%	670
0,5%	635
1%	625
1,5%	595

Tabel 3 menampilkan hasil pengujian *slump flow* pada beton *Self-Compacting Concrete* (SCC) sebelum dan sesudah penambahan serat baja. Data menunjukkan pola penurunan daya alir beton secara konsisten seiring peningkatan persentase volume serat baja. Campuran beton normal tanpa serat (0%) menghasilkan diameter aliran paling lebar. Sebaliknya, campuran beton dengan volume serat tertinggi (1,5%) mencatat daya alir paling sempit.

Penurunan *slump flow* ini terjadi akibat interaksi mekanis di dalam matriks beton segar. Serat baja menciptakan gesekan fisik tambahan antara agregat kasar dan mortar. Serat baja ini bertindak sebagai hambatan struktural yang menahan aliran beton secara mekanis. Penambahan volume serat baja yang terlalu tinggi memicu fenomena penggumpalan (*fiber balling*). Penggumpalan serat ini mengunci pergerakan material dan merusak kemampuan beton untuk memadat secara mandiri (Liu et al., 2025).

Tabel 4. Tabel perbandingan berat (kg) silinder pasca pembakaran 600°C

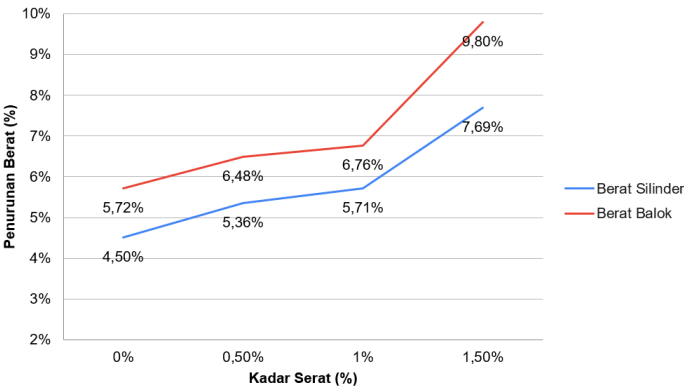
Variasi	25°C		600°C		Rata- rata penurunan berat (%)
	Sampel (kg)	Rata-rata(kg)	Sampel (kg)	Rata-rata (kg)	
0%	3,70	3,70	3,50	3,53	4,50%
	3,70		3,60		
	3,70		3,50		
0,50%	3,80	3,73	3,60	3,53	5,36%
	3,60		3,50		
	3,80		3,50		
1%	3,60	3,50	3,20	3,30	5,71%
	3,50		3,40		
	3,40		3,30		
1,50%	3,90	3,90	3,60	3,60	7,69%
	3,90		3,60		
	3,90		3,60		

Tabel 4 dan 5 menampilkan data penyusutan berat sampel beton pasca pembakaran pada suhu 600°C. Persentase penurunan berat meningkat secara konsisten seiring penambahan volume serat baja. Benda uji tanpa serat (0%) mencatat penyusutan paling kecil. Sebaliknya, variasi serat 1,5% mengalami penyusutan massa yang paling besar pada silinder maupun balok.

Tabel 5. Tabel perbandingan berat (kg) balok pasca pembakaran 600°C

Variasi	25°C		600°C		Rata- rata penurunan berat (%)
	Sampel (kg)	Rata-rata (kg)	Sampel (kg)	Rata-rata (kg)	
0%	10,20	9,90	9,70	9,33	5,72%
	9,20		8,50		
	10,30		9,80		
0,50%	9,70	9,77	9,20	9,13	6,48%
	9,80		9,00		
	9,80		9,20		
1%	9,70	9,37	8,60	8,73	6,76%
	9,00		8,80		
	9,40		8,80		
1,50%	9,70	9,87	8,60	8,90	9,80%
	10,10		9,00		
	9,80		8,70		

Gambar 2 mengilustrasikan penurunan berat beton pada suhu 600°C yang terjadi akibat dua fase degradasi utama. Pertama, air bebas dan air terikat di dalam rongga matriks beton menguap secara total. Kedua, suhu ekstrem memicu dekomposisi kimiawi pada produk hidrasi semen seperti kalsium hidroksida. Penambahan serat baja memperparah tingkat pelepasan massa ini. Material baja memiliki nilai konduktivitas termal yang sangat tinggi dibandingkan material beton. Serat baja bertindak sebagai konduktor internal yang menyalurkan panas secara masif ke inti terdalam spesimen. Penetrasi panas yang cepat ini memaksa kandungan air internal menguap secara lebih agresif (Abid et al., 2022).



Gambar 2. Grafik penurunan berat sampel pasca pembakaran 600°C



Gambar 3. Gambar sampel beton pasca pembakaran 600°C (kiri) dan sampel beton normal (kanan)

Gambar 3 menggambarkan secara visual, paparan suhu tinggi sebesar 600°C dapat memicu perubahan warna yang sangat kontras pada permukaan luar spesimen beton SCC jika dibandingkan dengan warna abu-abu semen homogen pada kondisi normal. Pengamatan visual pasca-pembakaran menunjukkan bahwa permukaan beton kontrol maupun beton berserat mengalami perubahan warna dominan menjadi abu-abu kemerahan hingga merah muda kusam, dengan titik-titik kecokelatan lokal pada area di sekitar paparan langsung ujung serat baja.

Secara ilmiah, perubahan warna beton pada suhu tinggi dikendalikan oleh transformasi kimiawi mineralogi senyawa besi oksida yang terkandung di dalam pasta semen maupun agregat halus/kasar. Berdasarkan penelitian oleh Hager et al. (2021), tanah liat dan pasir kuarsa yang menjadi bahan baku semen serta agregat mengandung senyawa besi trivalen berupa *goethite* dan *limonite*. Ketika suhu pembakaran melampaui 250°C hingga 350°C, *goethite* mengalami reaksi dehidrasi kimiawi dan bertransformasi menjadi mineral *hematite* yang memiliki pigmen kemerahan yang sangat kuat.

Saat suhu terus meningkat hingga mencapai 600°C, senyawa *hematite* mengalami oksidasi lebih lanjut dan sebagian mineral silikat (seperti kuarsa pada agregat) mengalami transisi fase kristalografi dari *alpha-quartz* menjadi *beta-quartz* yang mengembang dan memantulkan spektrum cahaya abu-abu kusam (Hager et al., 2021). Perpaduan antara kristal kuarsa yang terdegradasi termal dengan akumulasi pigmen besi *hematite* menghasilkan rona abu-abu kemerahan pada penampang makro beton. Lebih lanjut, keberadaan serat baja yang mengandung konsentrasi besi murni murni memperparah rona kemerahan/kecokelatan lokal di permukaan. Panas tinggi yang diantarkan serat memicu reaksi oksidasi termal cepat antara besi pada ujung serat baja dengan oksigen bebas, menghasilkan kerak oksida besi (*iron oxide scale*) berupa *magnetite* dan *hematite* di sekitar batas ITZ yang memancarkan rona karat kecokelatan kusam. Oleh karena itu, perubahan warna menjadi abu-abu kemerahan pasca-pembakaran 600 °C dapat dikategorikan sebagai indikator visual empiris bahwa beton telah mengalami kerusakan termal tingkat tinggi yang berkorelasi langsung dengan degradasi gel C-S-H dan penurunan drastis kuat mekanis beton di laboratorium (Hager et al., 2021).

Tabel 6. Tabel hasil tes kuat tekan rata-rata sebelum dan setelah pembakaran 600°C

Variasi	25°C		600°C		Rata- rata kuat tekan sisa (%)
	Sampel (MPa)	Rata-rata (MPa)	Sampel (MPa)	Rata-rata (MPa)	
0%	41,11	40,58	21,19	18,04	44,46%
	36,33		19,40		
	44,30		13,53		
0,50%	41,01	42,86	17,16	19,78	46,16%
	45,31		21,61		
	42,25		20,58		
1%	44,25	44,25	25,32	21,23	47,99%
	43,11		14,82		
	45,39		23,55		
1,50%	50,03	47,77	25,69	28,38	59,41%
	46,80		27,46		
	46,47		31,98		

Tabel 7. Tabel hasil tes kuat lentur rata-rata sebelum dan setelah pembakaran 600°C

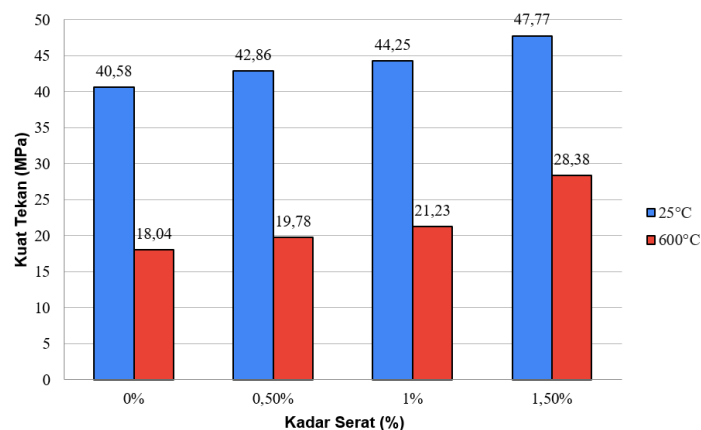
Variasi	25°C		600°C		Rata-rata kuat lentur sisa (%)
	Sampel (MPa)	Rata-rata (MPa)	Sampel (MPa)	Rata-rata (MPa)	
0%	6,23	5,83	1,16	1,09	18,64%
	5,93		1,05		
	5,34		1,05		
0,50%	6,83	6,39	3,11	3,04	47,65%
	6,75		3,01		
	5,58		3,01		
1%	6,52	7,17	4,65	4,37	60,85%
	7,43		4,23		
	7,57		4,22		
1,50%	9,20	9,50	6,38	5,93	62,40%
	10,32		5,01		
	8,97		6,38		

Tabel 6 dan 7 menampilkan tren kekuatan mekanis beton pada suhu normal (25°C) dan pasca pembakaran (600°C). Pada suhu normal, penambahan serat baja secara konsisten meningkatkan nilai kuat tekan dan kuat lentur. Kuat tekan beton tanpa serat tercatat sebesar 40,58 MPa. Nilai ini naik menjadi 42,86 MPa pada kadar serat 0,5%, lalu mencapai 44,25 MPa pada kadar 1%, dan mencatat angka tertinggi 47,77 MPa pada kadar 1,5%. Pola peningkatan serupa terjadi pada kuat lentur. Beton normal memiliki kuat lentur sebesar 5,83 MPa. Nilai ini meningkat menjadi 6,39 MPa pada penambahan serat 0,5% dan 7,17 MPa pada kadar 1%. Sampel dengan kadar serat 1,5% menghasilkan kuat lentur tertinggi sebesar 9,50 MPa.

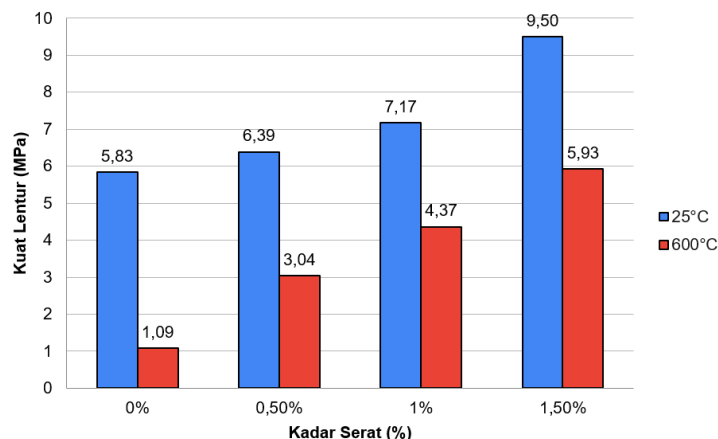
Penambahan serat baja meningkatkan kuat lentur melalui mekanisme penjemputan retak (*crack bridging*). Serat baja memiliki kekuatan dan modulus elastisitas yang jauh melebihi material beton sekitarnya. Karakteristik ini memperkuat adhesi antarmuka dan ikatan mekanis dengan pasta semen untuk menekan pembentukan retak mikro awal. Selain itu, kehadiran serat baja menghambat migrasi air di dalam beton dan menurunkan tegangan pori kapiler akibat penyusutan matriks. Saat beton menerima beban lentur dan retak mikro terbentuk, serat baja yang melintasi celah tersebut langsung mengambil alih tegangan tarik. Serat ini memanfaatkan adhesi antarmuka untuk menciptakan medan tegangan yang berlawanan arah dengan titik konsentrasi tegangan pada retakan. Medan tegangan berlawanan ini secara efektif meredam beban pada ujung retak mikro dan menghentikan perambatannya. Gesekan struktural antara serat baja dan matriks juga memberikan tahanan ekstra saat serat tercabut secara perlahan (*pull-out*). Perpaduan antara gaya ikat mekanis, medan tegangan berlawanan, dan gaya gesek ini membuat beton mampu memikul beban lentur yang lebih besar dan berdeformasi secara daktail sebelum keruntuhan total (Yang et al., 2024).

Sementara itu, peningkatan kuat tekan terjadi akibat efek kekangan multiaksial (*multi-axial confinement*). Saat beton menerima gaya tekan vertikal, material ini secara alami memuai ke arah samping (lateral). Jalinan serat baja yang tersebar acak bekerja sebagai tulangan mikro internal. Serat ini mengunci matriks dan memberikan perlawanan mekanis terhadap laju pemuai lateral tersebut. Kekangan pasif ini menunda penyatuan retak mikro menjadi retak makro. Semakin tinggi volume serat baja, semakin rapat jaringan kekangan ini bekerja. Kondisi ini membuat struktur beton mampu memikul beban tekan vertikal yang lebih besar sebelum hancur (Ahmad et al., 2023).

Paparan suhu 600°C menurunkan kapasitas mekanis seluruh sampel beton secara signifikan. Nilai absolut kuat tekan dan kuat lentur turun secara drastis. Kuat tekan beton tanpa serat turun dari 40,58 MPa menjadi 18,04 MPa. Pada kadar serat 0,5%, kuat tekan turun dari 42,86 MPa menjadi 19,78 MPa. Pada kadar serat 1%, kuat tekan turun dari 44,25 MPa menjadi 21,23 MPa. Sampel dengan serat 1,5% mengalami penurunan kuat tekan dari 47,77 MPa menjadi 28,38 MPa. Pola penurunan yang sama terlihat pada kuat lentur. Kuat lentur beton normal turun dari 5,83 MPa menjadi 1,09 MPa. Pada kadar serat 0,5%, kuat lentur turun dari 6,39 MPa menjadi 3,04 MPa. Pada kadar serat 1%, kuat lentur turun dari 7,17 MPa menjadi 4,37 MPa. Pada kadar serat 1,5%, kuat lentur turun dari 9,50 MPa menjadi 5,93 MPa. Perbandingan kenaikan serta penurunan kuat tekan dan kuat lentur beton dapat dilihat di Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Grafik perbandingan kuat tekan sampel beton sebelum dan sesudah pembakaran 600°C

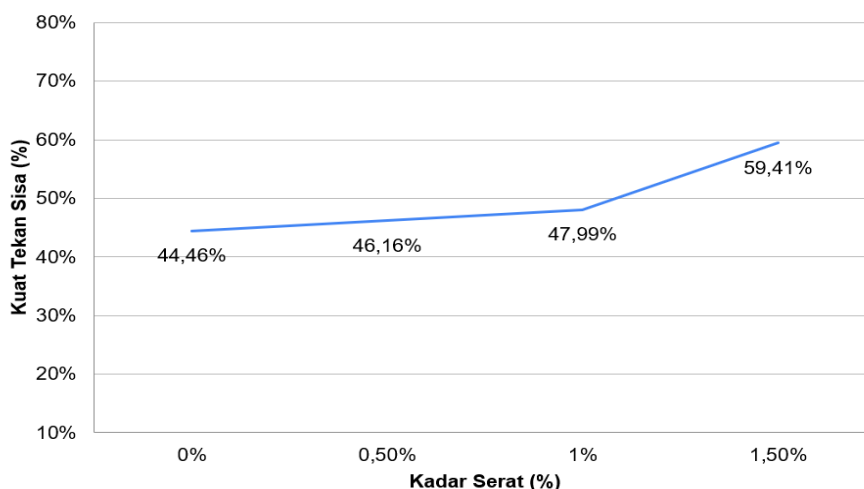


Gambar 5. Grafik perbandingan kuat lentur sampel beton sebelum dan sesudah pembakaran 600°C

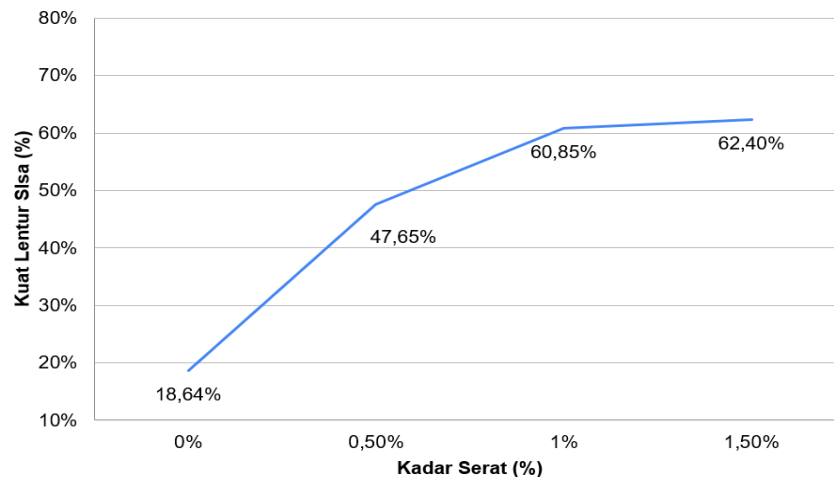
Penurunan kapasitas mekanis ini terjadi akibat serangkaian degradasi fisik dan kimiawi di dalam struktur mikro beton. Pada suhu ruang hingga 400°C, air bebas dan air terikat di dalam pori beton menguap dan menciptakan tekanan uap internal. Saat suhu mendekati 530°C, kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) yang merupakan produk hidrasi semen mengalami dekomposisi masif. Dekomposisi kimiawi ini memicu penyusutan kering (*dry shrinkage*) yang parah pada volume pasta semen (Hager, 2013).

Pada saat yang sama, agregat silika di dalam beton mengalami pemuai. Saat suhu mencapai titik 573°C, agregat silika mengalami transformasi fase kristal dari *alpha-quartz* menjadi *beta-quartz* yang memperbesar volume agregat secara mendadak. Pasta semen yang menyusut berbenturan dengan agregat yang memuai. Ketidakcocokan termal (*thermal mismatch*) ini menciptakan tegangan internal yang sangat tinggi. Tegangan ini merobek zona transisi antara pasta dan agregat, serta menyebarkan retak mikro secara masif ke seluruh penampang beton (Kodur, 2014). Selain itu, paparan suhu 600°C juga mulai mendegradasi gel kalsium silikat hidrat (C-S-H) sehingga beton kehilangan daya ikat utamanya (Madhavi et al., 2023). Kerusakan struktural berlapis inilah yang menurunkan angka absolut kuat tekan dan kuat lentur secara drastis.

Meskipun kekuatan turun secara signifikan, persentase kekuatan sisa membuktikan keunggulan struktural serat baja seperti yang disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Beton tanpa serat hanya menyisakan 44,46% kuat tekan dan 18,64% kuat lentur. Sebaliknya, beton berserat 1,5% sanggup mempertahankan 59,41% kuat tekan dan 62,40% kuat lentur sisa. Serat baja membentuk jaringan rangka internal yang memiliki daktilitas tinggi. Jaringan lentur ini sanggup menahan pergeseran ekstrem akibat ketidakcocokan termal antara agregat dan pasta semen. Serat secara efektif menahan perambatan retak mikro dan meredam kerusakan matriks. Mekanisme inilah yang memastikan struktur beton tetap memiliki kapasitas pikul beban sisa yang memadai pasca kebakaran (Zheng et al., 2024).



Gambar 6. Grafik kuat tekan sisa sampel beton pasca pembakaran 600°C



Gambar 7. Grafik kuat lentur sisa sampel beton pasca pembakaran 600°C

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, penambahan serat baja terbukti mengubah karakteristik *Self-Compacting Concrete* (SCC) secara fundamental. Pengaruh material perkuatan ini langsung terlihat secara fisik sejak fase beton segar, berlanjut pada peningkatan kekuatan beton di suhu normal, hingga pada akhirnya berfungsi sebagai elemen struktural penyelamat utama saat beton terpapar panas ekstrem pasca kebakaran.

Sejalan dengan tujuan penelitian pertama, hasil pengujian secara empiris membuktikan bahwa peningkatan volume serat baja secara konsisten mengurangi tingkat *workability* beton segar SCC. *Slump flow* mengalami penurunan drastis dari 670 mm pada beton kontrol menjadi 595 mm pada variasi serat tertinggi 1,5%. Penurunan daya alir ini diakibatkan oleh tingginya gesekan mekanis antar serat dan terserapnya pasta semen pelumas oleh permukaan serat.

Menjawab tujuan penelitian kedua, serat baja memberikan kontribusi positif yang besar terhadap peningkatan kapasitas mekanis beton keras pada suhu normal (25°C). Pada kadar 1,5%, kuat tekan meningkat dari 40,58 MPa menjadi 47,77 MPa, sementara kuat lentur meningkat juga dari 5,83 MPa menjadi 9,50 MPa. Peningkatan kekuatan mekanis ini didorong oleh efektivitas serat baja dalam mengambil alih tegangan elastis dan menjembatani retakan mikro secara optimal.

Untuk tujuan penelitian ketiga, keberadaan serat baja terbukti menjadi variabel yang penting dalam mempertahankan kekuatan mekanis sisa pasca paparan suhu 600°C. Saat beton kontrol tanpa serat hancur dan hanya menyisakan kapasitas kuat tekan 18,04 MPa dan kuat lentur 1,09 MPa, variasi serat 1,5% berhasil mengikat matriks yang rusak. Variasi ini efektif mempertahankan kuat tekan sisa sebesar 59,41% (28,38 MPa) dan menaikkan kuat lentur sisa hingga 62,40% (5,93 MPa).

Selain properti mekanis, paparan 600°C juga memengaruhi sifat fisik beton. Penyusutan berat terkecil dialami oleh beton kontrol tanpa serat yaitu sebesar 4,86% pada silinder dan 4,85% pada balok, sedangkan penyusutan terbesar terjadi pada variasi serat 1,5% dengan nilai mencapai 6,67% pada silinder dan 6,08% pada balok. Penyusutan yang lebih besar dialami oleh spesimen dengan kadar serat 1,5% karena tingginya konduktivitas termal baja mempercepat penguapan air internal. Secara visual, suhu ekstrem turut mengubah warna permukaan beton dari abu-abu menjadi abu-abu kemerahan akibat reaksi oksidasi senyawa besi pada agregat dan serat baja.

Berdasarkan hasil penelitian ini, peneliti merumuskan beberapa saran untuk pengembangan riset di masa mendatang. Pertama, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji variasi mutu beton yang berbeda seperti membandingkan SCC mutu normal dengan mutu sangat tinggi (UHPC), serta mengeksplorasi penggunaan ukuran panjang dan rasio aspek serat baja yang bervariasi. Pendekatan ini penting untuk memetakan kombinasi paling optimal antara kepadatan matriks dan geometri serat terhadap kapasitas mekanis sisa. Selain itu, evaluasi sifat beton segar harus diperluas menggunakan pengujian *J-ring*, *V-funnel*, dan *L-box* untuk memetakan parameter reologi secara utuh. Kedua, penelitian lanjutan disarankan menggunakan rentang suhu pembakaran yang lebih bertahap (misalnya 200°C, 400°C, dan 800°C) untuk mengidentifikasi batas kritis transisi degradasi material secara lebih presisi. Terakhir, peneliti merekomendasikan eksplorasi pemakaian sistem serat hibrida yang memadukan baja dan polipropilen. Karakteristik polipropilen yang mudah meleleh dapat difungsikan untuk membuka saluran pori mikro, sehingga tekanan uap air pasca kebakaran dapat terlepas dan risiko retak internal pada matriks SCC yang sangat padat dapat direduksi secara maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Abid, S. R., Abbass, A. A., Murali, G., Al-Sarray, M. L. J., Nader, I. A., & Ali, S. H. (2022). Post-high-temperature exposure repeated impact response of steel-fiber-reinforced concrete. *Buildings*, 12(9), 1364.
- Ahmad, J., Zhou, Z., & Deifalla, A. F. (2023). Steel fiber reinforced self-compacting concrete: A comprehensive review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1), 1-35.
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Cara Uji Kuat Lentur Beton Normal dengan Dua Titik Pembebanan* (SNI 4431:2011).
- Badan Standardisasi Nasional. (2011). *Cara Uji Kuat Tekan Beton dengan Benda Uji Silinder* (SNI 1974:2011).
- EFNARC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use*. EFNARC.
- Hager, I. (2013). Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61(1), 149–154.
- Kodur, V. (2014). Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering*, 2014, 1–15.
- Kushartomo, W., Prabowo, A., Christianto, D., & Sutandi, A. (2025). Spalling resistance and residual strength of hybrid fibre-reinforced reactive powder concrete at elevated temperatures. *Journal of Building Material Science*, 7(4), 128–141.
- Lee, J., Choi, K., & Hong, K. (2009). Color and material property changes in concrete exposed to high temperatures. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 8(1), 175-182.
- Liu, H., Shi, N., Yu, Z., & Zhu, Y. (2025). Research on working and mechanical properties of self-compacting steel-fiber-reinforced high-strength concrete. *Buildings*, 15(2875), 1-24.
- Limbo, L. S., Kushartomo, W., & Hermawan, P. (2026). Pengaruh temperatur pembakaran terhadap sifat mekanik SCC berpenguat serat baja. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*. (under review)
- Madhavi, C., Reddy, V. S., Rao, M. V. S., Shrihari, S., Kadhim, S. I., & Sharma, S. (2023). The effect of elevated temperature on self-compacting concrete: Physical and mechanical properties. *E3S Web of Conferences*, 391, 01212.
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5-15.
- Suryana, L. E., & Kushartomo, W. (2025). Pengaruh penambahan serat barchip 48 dalam pengujian kuat tarik lentur dan kuat tekan beton. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(3), 737–746.
- Yang, J., Zhang, Y., & Huang, J. (2024). The strengthening theory of steel fiber reinforced concrete and its application in tunnel engineering: A review. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19, 1-17.
- Zhang, P., Kang, L., Wang, J., Guo, J., Hu, S., & Ling, Y. (2020). Mechanical properties and explosive spalling behavior of steel-fiber-reinforced concrete exposed to high temperature—A review. *Applied Sciences*, 10(7), 2324.
- Zheng, Y., Zhang, W., Zheng, L., & Zheng, J. (2024). Mechanical properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete after high temperature exposure. *Construction and Building Materials*, 439, 137394.