Vol. 11, No. 2, 2026, pp. 637-653
DOI: https://doi.org/10.29210/30037071000

Contents lists available at Journal ELORA

JRTI (Jurnal Riset Tindakan Indonesia)
ISSN: 2502-079X (Print) ISSN: 2503-1619 (Electronic)

Journal homepage: https://jrti.eloracenter.org/jrti



Karakteristik beton SCC (*self-compacting concrete*) dengan penambahan serat baja dari limbah ban bekas sepeda motor dan serat *fiberglass*

Androi Androi*), Eka Juliafad
Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang, Indonesia

Article Info

Article history:

Received Sept 09th, 2026
Revised Oct 22th, 2026
Accepted Nov 27th, 2026

Keyword:

Beton SCC,
Limbah ban bekas,
Serat baja,
Fiberglass,
Karakteristik mekanis.

ABSTRAK

Pemanfaatan serat baja dari limbah ban bekas berpotensi mendukung pengembangan material konstruksi berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan serat baja dan *fiberglass* terhadap karakteristik fisik dan mekanis beton *Self-Compacting Concrete* (SCC). Penelitian menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan tujuh variasi campuran berdasarkan jenis serat dan kadar penambahan 0%, 1%, dan 1,5% terhadap berat semen. Sebanyak 63 benda uji digunakan, terdiri atas 42 silinder dan 21 balok, dengan tiga spesimen per variasi untuk setiap pengujian mekanis. Data dianalisis secara deskriptif komparatif berdasarkan nilai rata-rata dan persentase perubahan terhadap beton kontrol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat meningkatkan berat benda uji dan perubahan massa akibat perendaman. Variasi serat baja 1,5% menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik belah rata-rata tertinggi pada umur 28 hari, masing-masing sebesar 68,465 MPa dan 5,346 MPa, dengan peningkatan sebesar 106,80% dan 71,62%. Variasi tersebut juga menghasilkan peningkatan kuat lentur sebesar 31,69%. Secara deskriptif, serat baja 1,5% memberikan kinerja mekanis terbaik di antara variasi yang diuji. Temuan ini memperlihatkan potensi pemanfaatan serat baja dari limbah ban bekas sebagai material penguat alternatif dalam pengembangan beton SCC.

© 2026The Authors.
This is an open access article under the CC BY-NC-SA license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0)

Corresponding Author:

Androi,
Universitas Negeri Padang
Email: androi050997@gmail.com

Pendahuluan

Perkembangan industri konstruksi mendorong kebutuhan terhadap material beton yang tidak hanya memiliki kekuatan mekanis tinggi, tetapi juga memenuhi aspek efisiensi pelaksanaan, durabilitas, dan keberlanjutan lingkungan. Beton merupakan material utama dalam pembangunan infrastruktur karena memiliki kemampuan menahan beban tekan, mudah dibentuk, serta dapat diproduksi menggunakan material yang relatif mudah diperoleh. Meskipun demikian, beton memiliki keterbatasan berupa kuat tarik yang relatif rendah dan perilaku getas, sehingga rentan mengalami keretakan akibat tegangan tarik maupun lentur. Salah satu pendekatan untuk mengatasi keterbatasan tersebut adalah penambahan serat yang bekerja melalui mekanisme penghubung retakan (*crack bridging*), sehingga mampu menghambat perkembangan retak dan meningkatkan kapasitas beton dalam menerima beban. Seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap keberlanjutan lingkungan, penggunaan material daur ulang sebagai penguat beton menjadi alternatif yang relevan untuk mengurangi ketergantungan

terhadap bahan penguat konvensional sekaligus meningkatkan nilai guna limbah industri. Samarakoon et al. (2019) menunjukkan potensi pemanfaatan serat baja daur ulang sebagai material penguat beton. Pawelska-Mazur dan Kaszynska (2021) juga mengkaji pemanfaatan serat baja daur ulang sebagai alternatif penguatan beton yang mendukung prinsip keberlanjutan.

Salah satu limbah industri otomotif yang berpotensi dimanfaatkan dalam teknologi beton adalah ban bekas kendaraan bermotor. Ban merupakan material komposit yang tersusun atas karet alam, karet sintetis, material tekstil, dan komponen baja yang berfungsi sebagai penguat struktural. Komponen baja tersebut dapat dipisahkan dan dimanfaatkan kembali sebagai *recycled tire steel fibers* (RTSF). Pemanfaatan RTSF dalam beton merupakan salah satu bentuk penerapan prinsip ekonomi sirkular (*circular economy*) melalui pengembalian material limbah ke dalam siklus produksi. Samarakoon et al. (2019) menginvestigasi karakteristik mekanis beton yang diperkuat serat baja hasil daur ulang ban dan membandingkannya dengan serat baja produksi industri. Penelitian tersebut menunjukkan potensi pemanfaatan RTSF sebagai material penguat alternatif, meskipun ketidakseragaman karakteristik geometrisnya menjadi aspek yang perlu dipertimbangkan. Selanjutnya, Pawelska-Mazur dan Kaszynska (2021) melaporkan bahwa pemanfaatan serat baja daur ulang mampu meningkatkan kuat tarik belah sebesar 43% dibandingkan beton tanpa serat dalam kondisi pengujian mereka. Temuan tersebut memperkuat bukti bahwa komponen baja dari limbah ban memiliki potensi mekanis sekaligus nilai lingkungan sebagai material penguat beton.

Perkembangan penelitian selanjutnya memperlihatkan bahwa efektivitas RTSF sangat dipengaruhi oleh kadar penambahan, karakteristik geometris, distribusi serat, serta komposisi matriks beton. Penelitian berjudul *Dynamic Compressive Behaviour of Recycled Tyre Steel Fibre Reinforced Concrete* (2022) mengevaluasi penambahan RTSF pada kadar 0,5%, 0,75%, 1,0%, dan 1,25%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kadar serat tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja mekanis secara linear. Kadar 0,75% memberikan keseimbangan terbaik berdasarkan kemampuan pengerjaan, kuat tekan, dan respons tekan dinamis pada kondisi penelitian tersebut. Sementara itu, Su et al. (2023) membandingkan beton yang mengandung RTSF pada fraksi volume 0,5%, 1,0%, dan 1,5% dengan beton yang diperkuat serat baja industri. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kuat tarik belah hingga 15,4%, disertai penurunan nilai *slump* hingga 19%. Perbedaan hasil tersebut mengindikasikan bahwa peningkatan karakteristik mekanis beton berserat perlu mempertimbangkan konsekuensinya terhadap kemampuan pengerjaan beton segar. Dengan demikian, penentuan kadar serat yang sesuai tidak dapat digeneralisasikan tanpa mempertimbangkan karakteristik material dan sistem campuran beton yang digunakan.

Selain pengembangan material penguat berbasis limbah, inovasi teknologi beton juga diarahkan pada peningkatan efisiensi pelaksanaan konstruksi melalui penggunaan *Self-Compacting Concrete* (SCC). SCC merupakan beton yang mampu mengalir, mengisi ruang bekisting, dan memadat dengan beratnya sendiri tanpa bantuan penggetar mekanis. Konsep SCC dikembangkan di Jepang pada tahun 1988 untuk meningkatkan kualitas dan keandalan pelaksanaan konstruksi beton. Okamura dan Ouchi (2003) menjelaskan bahwa pengembangan SCC ditujukan untuk menghasilkan beton dengan kemampuan memadat sendiri sehingga dapat mengurangi permasalahan kualitas konstruksi akibat pemadatan yang tidak memadai. Menurut EFNARC (2005), karakteristik utama SCC meliputi kemampuan mengisi ruang (*filling ability*), kemampuan melewati celah tulangan (*passing ability*), dan ketahanan terhadap segregasi (*segregation resistance*). Penambahan serat pada SCC dapat meningkatkan interaksi mekanis dalam matriks beton, tetapi sekaligus meningkatkan hambatan aliran akibat interaksi antara serat dan agregat. Oleh karena itu, pengembangan SCC berserat memerlukan pengendalian komposisi campuran agar peningkatan karakteristik mekanis tidak mengorbankan kemampuan alir beton segar.

Penggunaan RTSF secara khusus pada SCC telah dikaji oleh Simalti dan Singh (2021) melalui perbandingan serat baja hasil pencacahan ban bekas dengan serat baja komersial pada fraksi volume 0,5%, 1,0%, dan 1,5%. Penelitian tersebut mengevaluasi sifat beton segar melalui pengujian *slump flow* dan *J-Ring*, serta karakteristik beton keras melalui pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan durabilitas. Hasilnya menunjukkan bahwa SCC dengan penambahan RTSF sebesar 1,5% berdasarkan volume memberikan kinerja keseluruhan terbaik dalam ruang lingkup komposisi yang diuji. Jika dibandingkan dengan penelitian *Dynamic Compressive Behaviour of Recycled Tyre Steel Fibre Reinforced Concrete* (2022), terdapat perbedaan kecenderungan kadar serat yang memberikan kinerja terbaik. Su et al. (2023) juga memperlihatkan bahwa peningkatan karakteristik mekanis akibat penambahan RTSF dapat disertai penurunan kemampuan pengerjaan beton segar. Perbedaan tersebut memperlihatkan pentingnya evaluasi terhadap jenis beton, karakteristik serat, metode penentuan kadar, dan parameter kinerja yang digunakan. Selain itu, penelitian-penelitian tersebut lebih banyak berfokus pada evaluasi RTSF dan perbandingannya dengan serat baja komersial, sehingga belum secara langsung menjelaskan perilaku kombinasi RTSF dengan serat kaca pada SCC.

Pendekatan lain dalam pengembangan beton berserat adalah penggunaan sistem penguatan hibrida (*hybrid fiber reinforcement*) yang mengombinasikan dua jenis serat dengan karakteristik berbeda. Serat baja memiliki kekakuan dan kemampuan menjembatani retakan yang baik, sedangkan serat kaca (*fiberglass*) memiliki kekuatan tarik relatif tinggi dan bobot yang lebih ringan. Ganta et al. (2020) mengevaluasi penggunaan serat baja, serat kaca, dan kombinasi keduanya pada SCC melalui pendekatan *packing factor*, dengan mempertimbangkan karakteristik mekanis dan durabilitas beton. Penelitian tersebut memberikan landasan bagi pengembangan sistem penguatan hibrida pada SCC. Studi berjudul *Synergetic Effects of Hybrid Steel and Recycled Tyre Polymer Fibres on Workability, Mechanical Strengths and Toughness of Concrete* (2023) juga menunjukkan bahwa kombinasi serat baja dan serat polimer hasil daur ulang ban dapat menghasilkan peningkatan karakteristik mekanis, tetapi juga menyebabkan penurunan kemampuan pengerjaan beton. Meskipun jenis serat yang digunakan berbeda, temuan tersebut memperkuat argumentasi bahwa sistem penguatan hibrida memerlukan evaluasi terhadap keseimbangan antara sifat beton segar dan karakteristik mekanis beton keras.

Berdasarkan sintesis komparatif penelitian periode 2019–2024, terdapat tiga kecenderungan utama dalam pengembangan beton berserat. Pertama, penelitian terdahulu telah membuktikan potensi RTSF sebagai alternatif material penguat beton, tetapi efektivitasnya dipengaruhi oleh karakteristik geometris dan kadar serat yang digunakan. Samarakoon et al. (2019) mengkaji potensi serat baja hasil daur ulang ban sebagai material penguat alternatif. Pawelska-Mazur dan Kaszynska (2021) menunjukkan peningkatan karakteristik tarik beton melalui pemanfaatan serat baja daur ulang. Su et al. (2023) memperlihatkan bahwa perubahan kadar RTSF dapat memengaruhi karakteristik mekanis sekaligus kemampuan pengerjaan beton. Kedua, penelitian mengenai RTSF pada SCC masih menghadapi tantangan dalam mempertahankan keseimbangan antara kemampuan alir dan peningkatan karakteristik mekanis. Simalti dan Singh (2021) menunjukkan bahwa variasi kadar RTSF memengaruhi karakteristik beton segar dan beton keras. Ketiga, penelitian tentang penguatan hibrida menunjukkan potensi kombinasi serat dengan karakteristik berbeda, tetapi hasilnya bergantung pada jenis material dan komposisi serat. Ganta et al. (2020) memberikan landasan mengenai penggunaan kombinasi serat baja dan serat kaca pada SCC.

Berdasarkan studi-studi tersebut, belum diperoleh penjelasan empiris yang memadai mengenai kinerja SCC yang menggunakan serat baja dari limbah ban bekas sepeda motor dengan panjang terkontrol 25 mm, dipisahkan secara mekanis tanpa pembakaran, dan dikombinasikan dengan serat fiberglass komersial. Selain itu, penelitian terdahulu yang menggunakan fraksi volume serat tidak secara langsung menjelaskan kinerja campuran dengan kadar serat berdasarkan berat semen. Kesenjangan tersebut menjadi dasar perlunya investigasi eksperimental terhadap pengaruh jenis dan kadar serat, baik secara tunggal maupun kombinasi, terhadap kemampuan alir, karakteristik fisik, dan kinerja mekanis SCC.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pendekatan eksperimental yang mengintegrasikan pemanfaatan serat baja hasil pemisahan mekanis tanpa pembakaran dari limbah ban bekas sepeda motor dengan serat fiberglass dalam sistem penguatan tunggal dan hibrida pada SCC. Berbeda dengan penelitian Samarakoon et al. (2019) yang mengkaji karakteristik mekanis beton menggunakan serat baja hasil daur ulang ban, penelitian ini secara khusus menggunakan serat baja yang berasal dari limbah ban bekas sepeda motor dengan panjang terkontrol sebesar 25 mm. Penelitian Simalti dan Singh (2021) berfokus pada perbandingan RTSF dengan serat baja komersial pada SCC, sedangkan penelitian ini memperluas evaluasi melalui penggunaan serat fiberglass dan kombinasi kedua jenis serat. Su et al. (2023) mengkaji pengaruh RTSF terhadap karakteristik mekanis dan durabilitas beton, sedangkan penelitian ini membandingkan kinerja serat baja daur ulang, serat fiberglass, dan kombinasi keduanya dalam satu rancangan eksperimental. Penelitian ini juga memiliki perbedaan dengan Ganta et al. (2020) dalam hal sumber dan metode preparasi serat baja, panjang serat yang digunakan, serta penetapan kadar penambahan serat berdasarkan berat semen. Evaluasi dilakukan secara terintegrasi terhadap kemampuan alir beton segar, daya serap air, berat benda uji, kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur. Pendekatan tersebut memungkinkan identifikasi komposisi serat yang memberikan keseimbangan antara karakteristik fisik, kemampuan alir, dan kinerja mekanis beton SCC.

Penelitian ini bertujuan menginvestigasi pengaruh penambahan serat baja daur ulang dari limbah ban bekas sepeda motor, serat fiberglass, dan kombinasi keduanya pada kadar 1% dan 1,5% berdasarkan berat semen terhadap karakteristik beton SCC dengan mutu rencana \(f'_c\) sebesar 30 MPa. Secara khusus, penelitian ini bertujuan: (1) menganalisis pengaruh jenis dan kadar serat terhadap kemampuan alir beton segar berdasarkan nilai *slump flow* (mm); (2) mengevaluasi karakteristik fisik beton berdasarkan daya serap air (%) dan berat benda uji (kg); (3) membandingkan kinerja mekanis beton tanpa serat, beton dengan serat tunggal, dan beton dengan serat hibrida berdasarkan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur (MPa) pada umur 28 hari; serta (4) mengidentifikasi variasi campuran terbaik di antara komposisi yang diuji dengan mempertimbangkan target mutu beton dan kemampuan alir SCC. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi empiris terhadap

pengembangan beton berserat berbasis material daur ulang serta mendukung pemanfaatan limbah ban bekas dalam teknologi konstruksi berkelanjutan.

.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium dengan pendekatan kuantitatif untuk menginvestigasi pengaruh penambahan serat baja dari limbah ban bekas sepeda motor dan serat fiberglass terhadap karakteristik beton *Self-Compacting Concrete* (SCC). Penelitian dilaksanakan pada Juni–September 2026 di Laboratorium Bahan, Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang. Parameter yang diamati meliputi kemampuan alir beton segar (*slump flow*), perubahan massa akibat perendaman, berat benda uji, kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur beton. Mutu beton direncanakan sebesar 30 MPa dengan target *slump flow* 600–650 mm. Pengujian kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur dilakukan pada umur beton 28 hari.

Material yang digunakan dalam penelitian meliputi semen *Portland Composite Cement* (PCC), agregat halus berupa pasir, agregat kasar berupa kerikil, air, serat baja hasil pemisahan dari limbah ban bekas sepeda motor, serta serat fiberglass yang tersedia secara komersial. Serat baja diperoleh melalui proses pemisahan mekanis menggunakan pisau untuk memisahkan komponen baja dari karet ban tanpa melalui proses pembakaran. Serat baja yang telah dipisahkan kemudian dipotong dengan panjang 2,5 cm. Sementara itu, serat fiberglass digunakan sebagai material penguat tambahan dalam campuran beton. Kedua jenis serat tersebut diaplikasikan secara tunggal maupun kombinasi untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap karakteristik beton SCC.



Gambar 1. Limbah Ban Bekas Sepeda Motor



Gambar 2. Serat Baja Ban Bekas Sepeda Motor



Gambar 3. *Serat Fiberglass*

Sebelum pembuatan campuran beton, dilakukan pengujian karakteristik agregat halus dan agregat kasar untuk mengetahui kelayakan material yang digunakan. Pengujian agregat halus meliputi kadar lumpur, kadar air nyata, kadar air *Saturated Surface Dry* (SSD), berat jenis, berat isi padat, analisis ayakan, dan kandungan zat organik. Pengujian agregat kasar meliputi berat isi, berat jenis SSD, kadar lumpur, keausan agregat menggunakan mesin Los Angeles, daya serap air, dan analisis ayakan. Hasil pemeriksaan digunakan sebagai dasar dalam menentukan karakteristik material dan perencanaan campuran beton.

Perencanaan campuran beton (*mix design*) dilakukan menggunakan metode *Department of the Environment* (DOE) dengan mengacu pada SNI 03-2834-2000. Perencanaan tersebut meliputi penentuan kuat tekan rencana, faktor air semen (FAS), kebutuhan air, kebutuhan semen, serta proporsi agregat halus dan agregat kasar. Komposisi campuran dirancang untuk menghasilkan beton dengan mutu rencana 30 MPa dan kemampuan alir sebesar 600–650 mm. Penambahan serat baja dan fiberglass ditentukan berdasarkan persentase berat semen yang digunakan dalam campuran beton.

Rancangan eksperimen terdiri atas tujuh variasi campuran, yaitu beton normal tanpa penambahan serat (BN), beton dengan serat baja dari limbah ban bekas sepeda motor sebesar 1% (BSB-1) dan 1,5% (BSB-2), beton dengan serat fiberglass sebesar 1% (BSF-1) dan 1,5% (BSF-2), serta beton dengan kombinasi serat baja dan fiberglass sebesar 1% (BSBF-1) dan 1,5% (BSBF-2). Seluruh persentase penambahan serat dinyatakan berdasarkan berat semen. Rancangan tersebut digunakan untuk membandingkan karakteristik beton tanpa serat, beton dengan penguatan serat tunggal, dan beton dengan penguatan kombinasi kedua jenis serat.

Benda uji yang digunakan terdiri atas silinder beton berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm sebanyak 42 buah serta balok beton berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm sebanyak 21 buah. Setiap variasi campuran menggunakan enam benda uji silinder dan tiga benda uji balok. Benda uji silinder dibagi untuk pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah, masing-masing sebanyak tiga buah, sedangkan tiga benda uji balok digunakan untuk pengujian kuat lentur. Dengan demikian, jumlah keseluruhan benda uji adalah 63 buah. Distribusi benda uji berdasarkan variasi campuran dan jenis pengujian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Matriks perlakuan dan distribusi benda uji penelitian

Kode	Jenis serat	Kadar (%)	Tekan	Tarik belah	Lentur	Total
BN	Tanpa serat	0	3	3	3	9
BSB-1	Baja	1,0	3	3	3	9
BSB-2	Baja	1,5	3	3	3	9
BSF-1	Fiberglass	1,0	3	3	3	9
BSF-2	Fiberglass	1,5	3	3	3	9
BSBF-1	Baja + fiberglass	1,0	3	3	3	9
BSBF-2	Baja + fiberglass	1,5	3	3	3	9
Total			**21**	**21**	**21**	**63**

Pembuatan benda uji dilakukan menggunakan mesin pengaduk beton (*concrete mixer*). Sebelum proses pencampuran, seluruh material dan peralatan disiapkan, kadar air pasir diperiksa, mesin pengaduk dibersihkan, serta cetakan silinder dan balok dilumasi menggunakan minyak pelumas. Proses pencampuran diawali dengan memasukkan tiga perempat kebutuhan air ke dalam mesin pengaduk, kemudian agregat kasar dimasukkan dan diaduk. Selanjutnya, agregat halus ditambahkan secara bertahap hingga tercampur merata, kemudian semen dimasukkan ke dalam campuran. Pada campuran yang menggunakan serat baja, serat ditambahkan sesuai persentase yang direncanakan setelah semen dimasukkan. Pada campuran fiberglass, serat ditaburkan secara bertahap ke dalam adukan. Sementara itu, pada campuran kombinasi, serat baja dimasukkan terlebih dahulu dan diaduk sebentar, kemudian diikuti dengan penambahan serat fiberglass. Sisa air ditambahkan sedikit demi sedikit sesuai takaran hingga campuran mencapai kondisi yang diharapkan.

Setelah proses pencampuran selesai, dilakukan pemeriksaan beton segar menggunakan pengujian *slump flow test*. Pengujian dilakukan dengan meletakkan pelat dasar pada permukaan yang datar dan stabil, kemudian kerucut *slump* ditempatkan di tengah pelat. Beton segar dimasukkan ke dalam kerucut dalam satu kali pengisian hingga penuh tanpa penusukan atau pemadatan. Permukaan beton diratakan, kemudian kerucut diangkat secara vertikal dalam waktu sekitar 2–4 detik. Beton dibiarkan mengalir dan menyebar dengan sendirinya di atas pelat. Setelah aliran berhenti, dilakukan pengukuran terhadap dua diameter penyebaran yang saling tegak lurus menggunakan pita ukur. Nilai *slump flow* diperoleh dari rata-rata kedua diameter tersebut. Hasil pengujian digunakan untuk mengevaluasi kemampuan alir beton segar dan dibandingkan dengan target penelitian sebesar 600–650 mm.

Setelah pengujian beton segar, dilakukan pemeriksaan berat isi beton segar menggunakan wadah ukur. Wadah kosong ditimbang sebagai berat awal, kemudian diisi air untuk memperoleh berat wadah berisi air. Selanjutnya, wadah diisi beton segar dan ditimbang untuk memperoleh berat beton dalam volume wadah tersebut. Beton yang telah diperiksa kemudian dipindahkan ke dalam cetakan silinder dan balok. Pengisian cetakan dilakukan secara bertahap tanpa menggunakan alat penggetar karena campuran dirancang sebagai SCC yang mampu memadat dengan beratnya sendiri. Setelah cetakan terisi penuh, bagian samping cetakan dipukul menggunakan palu karet. Benda uji kemudian didiamkan selama kurang lebih 24 jam sebelum cetakan dibuka. Seluruh benda uji diberi identitas sesuai variasi campuran untuk memudahkan proses perawatan dan pengujian.

Perawatan benda uji (*curing*) dilakukan dengan cara merendam seluruh benda uji di dalam bak berisi air hingga mencapai umur pengujian. Perawatan bertujuan menjaga kondisi kelembapan beton selama proses pengerasan. Pengujian karakteristik mekanis, yang meliputi kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur, dilakukan ketika beton mencapai umur 28 hari. Sebelum pengujian, benda uji dikeluarkan dari bak perendaman dan dibiarkan hingga permukaannya kering.

Pengujian karakteristik fisik beton meliputi pengujian perubahan massa akibat perendaman dan penimbangan berat benda uji. Pengujian perubahan massa dilakukan dengan menimbang benda uji sebelum perendaman, kemudian menimbang kembali setelah benda uji direndam selama 28 hari sebagai bagian dari proses perawatan. Sebelum penimbangan akhir, benda uji dikeluarkan dari bak, dibersihkan, dan dilap menggunakan kain untuk menghilangkan air pada permukaannya. Persentase perubahan massa dihitung berdasarkan selisih berat setelah dan sebelum perendaman terhadap berat awal benda uji. Pengujian berat dilakukan terhadap benda uji silinder dan balok setelah proses perawatan selesai untuk mengetahui perbedaan berat beton normal dan beton dengan penambahan serat.

Pengujian kuat tekan dilakukan pada benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) pada umur 28 hari. Sebelum pengujian, benda uji dikeluarkan dari bak perendaman dan dibiarkan hingga permukaannya kering. Selanjutnya, diameter dan tinggi benda uji diukur serta beratnya ditimbang. Benda uji kemudian ditempatkan pada mesin tekan dalam posisi seimbang dan diberikan pembebanan secara konstan hingga mencapai beban maksimum. Hasil pembacaan beban maksimum

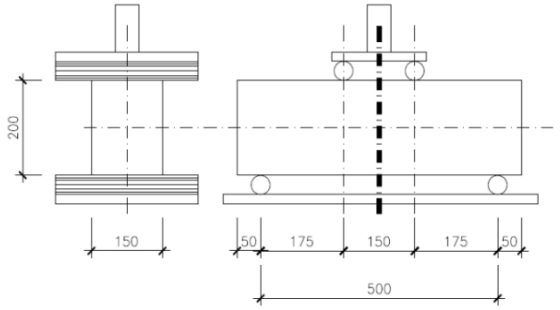
dicatat untuk menentukan nilai kuat tekan beton. Pengujian kuat tekan dalam tesis mengacu pada SNI 03-6815-2002.

Pengujian kuat tarik belah dilakukan menggunakan *Compression Testing Machine* (CTM) terhadap benda uji silinder pada umur 28 hari. Benda uji yang telah dikeluarkan dari bak perawatan dikeringkan pada bagian permukaannya, kemudian ditempatkan secara horizontal pada mesin pengujian dalam posisi seimbang. Pembebanan diberikan secara bertahap dan konstan hingga benda uji mengalami keruntuhan akibat tegangan tarik tidak langsung. Beban maksimum yang terbaca pada mesin dicatat sebagai dasar perhitungan kuat tarik belah beton. Nilai kuat tarik belah dihitung menggunakan persamaan:

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi LD}$$

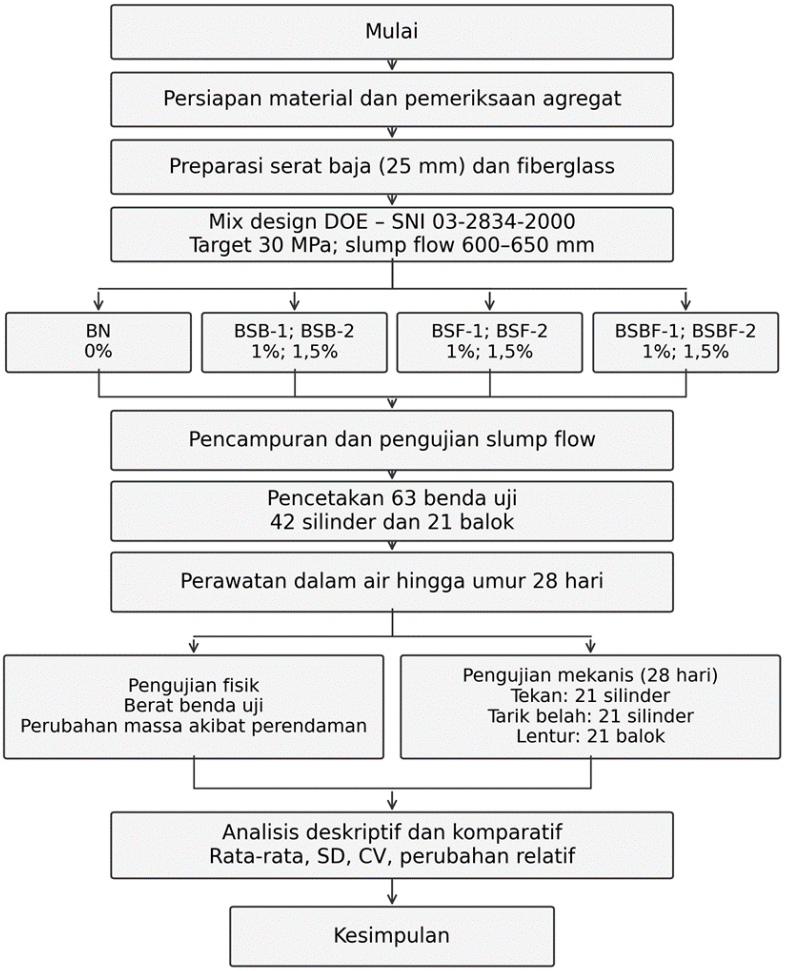
fct = kuat tarik belah (MPa); P = beban maksimum (N); L = panjang silinder (mm); D = diameter silinder (mm).

Pengujian kuat lentur dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) terhadap benda uji balok berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm pada umur 28 hari. Pengujian mengacu pada SNI 4431:2011. Benda uji dikeluarkan dari bak perawatan dan dibiarkan hingga permukaannya kering, kemudian ditempatkan pada mesin uji lentur dalam posisi seimbang. Pembebanan diberikan secara konstan hingga benda uji mengalami keruntuhan. Beban maksimum yang terbaca pada mesin dicatat, kemudian jarak antara tumpuan dan lokasi patahan diukur untuk menentukan nilai kuat lentur beton. Perhitungan kuat lentur dilakukan berdasarkan lokasi keruntuhan benda uji sesuai ketentuan persamaan pengujian yang digunakan.



Gambar 4. Pengujian kuat lentur beton

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dan komparatif. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian beton normal terhadap beton dengan penambahan serat baja, fiberglass, dan kombinasi keduanya. Parameter yang dianalisis meliputi nilai *slump flow*, perubahan massa akibat perendaman, berat benda uji, kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur. Hasil setiap pengujian digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan perubahan karakteristik beton akibat perbedaan jenis dan kadar penambahan serat. Perbandingan dilakukan berdasarkan nilai rata-rata hasil pengujian setiap variasi serta persentase perubahan terhadap beton normal. Selanjutnya, variasi campuran dievaluasi berdasarkan pencapaian mutu beton rencana 30 MPa, target *slump flow* 600–650 mm, serta kinerja kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur. Seluruh tahapan penelitian mulai dari persiapan material hingga analisis hasil pengujian disajikan dalam bagan alir penelitian pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir pelaksanaan penelitian

Hasil dan Pembahasan

Karakteristik Agregat dan Implikasinya terhadap Kinerja Beton SCC

Karakteristik agregat merupakan salah satu faktor yang menentukan kemampuan alir, stabilitas campuran, kebutuhan air efektif, dan karakteristik mekanis *Self-Compacting Concrete* (SCC). Berbeda dengan beton konvensional, SCC memerlukan keseimbangan antara distribusi ukuran agregat, volume pasta semen, dan interaksi antarpartikel agar mampu mengalir dengan beratnya sendiri. Okamura dan Ouchi (2003) menjelaskan bahwa pengendalian proporsi agregat dan karakteristik pasta merupakan prinsip mendasar dalam menghasilkan beton dengan kemampuan pemadatan mandiri.

Hasil pemeriksaan agregat halus dan agregat kasar dalam penelitian ini digunakan sebagai dasar perencanaan campuran sekaligus untuk mengidentifikasi karakteristik material yang berpotensi memengaruhi respons beton terhadap penambahan serat baja dan fiberglass. Hubungan antara karakteristik agregat dan parameter kinerja SCC disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Karakteristik agregat dan implikasinya terhadap kinerja beton SCC

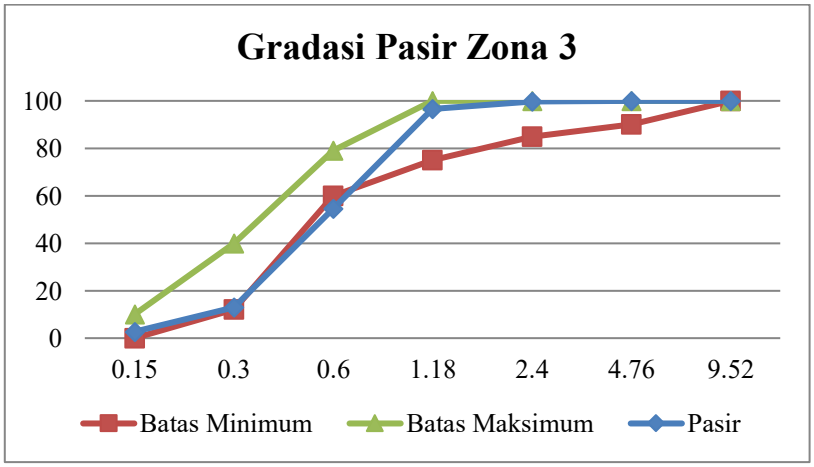
Material	Parameter	Hasil	Acuan	Implikasi
Halus	Kadar lumpur	2,70%	Maks. 5% (acuan penelitian)	Ikatan pasta
Halus	Kadar air aktual / SSD	1,91 / 3,38%	Kondisi aktual / SSD	Air efektif
Halus	Berat jenis aktual / SSD	2,43 / 2,35	SNI 1970:2008	Proporsi material
Halus	Zat organik	≤ warna 3	Warna No. 3	Hidrasi
Halus	Berat isi padat	1.371 kg/m³	Pengukuran	Susunan butir
Halus	Modulus kehalusan	2,67	Zona III	Aliran / pasta
Kasar	Berat isi	1.400 kg/m³	Pengukuran	Susunan butir

Material	Parameter	Hasil	Acuan	Implikasi
Kasar	Berat jenis SSD	2,50	SNI 1969:2008	Proporsi
Kasar	Kadar lumpur	0,35%	Pengukuran	Ikatan
Kasar	Keausan LA	33,90%	Maks. 40% (acuan penelitian)	Ketahanan abrasi
Kasar	Daya serap	1,02%	SNI 1969:2008	Air efektif
Kasar	Modulus kehalusan	5,53	Analisis ayakan	Aliran

Kadar lumpur agregat halus sebesar 2,70% berada di bawah batas maksimum 5% yang digunakan dalam penelitian, sedangkan kadar lumpur agregat kasar sebesar 0,35% menunjukkan kandungan material halus yang relatif rendah. Kondisi tersebut berpotensi mendukung pembentukan ikatan antara agregat dan pasta semen. Partikel lumpur yang berlebihan dapat meningkatkan kebutuhan air dan mengganggu kualitas zona transisi antarmuka atau *interfacial transition zone* (ITZ). Scrivener et al. (2004) menjelaskan bahwa karakteristik zona transisi antarmuka berperan penting dalam menentukan perilaku mekanis material berbasis semen.

Perbedaan kadar air aktual dan kadar air SSD agregat halus mencapai 1,47 poin persentase. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa agregat halus berpotensi menyerap sebagian air pencampuran apabila belum mencapai kondisi SSD. Dalam sistem SCC, perubahan ketersediaan air efektif dapat memengaruhi viskositas pasta, kemampuan alir, dan perkembangan kekuatan beton. Brouwers dan Radix (2005) menekankan pentingnya pengendalian proporsi material dan distribusi ukuran partikel dalam menghasilkan campuran SCC yang stabil.

Agregat halus memiliki modulus kehalusan sebesar 2,67 dengan distribusi gradasi yang dilaporkan berada pada zona III. Karakteristik pasir yang relatif halus dapat mendukung pengisian rongga antarpartikel, tetapi juga meningkatkan luas permukaan agregat yang harus dilapisi pasta semen. Oleh karena itu, karakteristik tersebut perlu dipertimbangkan bersama penambahan serat, yang berpotensi meningkatkan hambatan aliran beton segar.



Gambar 6. Distribusi gradasi agregat halus zona III.

Berat isi padat agregat halus sebesar 1.371 kg/m³ dan berat isi agregat kasar sebesar 1.400 kg/m³ memberikan informasi mengenai susunan butiran dalam kondisi pengujian. Parameter tersebut berhubungan dengan kebutuhan volume pasta untuk mengisi rongga antaragregat. Su et al. (2001) menjelaskan bahwa proporsi agregat dan volume pasta merupakan komponen penting dalam perencanaan campuran SCC. Namun, berat isi agregat tidak dapat secara langsung digunakan untuk menyimpulkan porositas beton setelah pengerasan.

Nilai keausan agregat kasar sebesar 33,90% berada di bawah batas 40% yang digunakan sebagai acuan penelitian. Hasil tersebut menunjukkan bahwa agregat memenuhi kriteria ketahanan abrasi berdasarkan batas tersebut. Sementara itu, daya serap air sebesar 1,02% menunjukkan bahwa penyerapan air oleh agregat kasar tetap perlu diperhitungkan dalam penentuan kebutuhan air pencampuran. Karakteristik mekanis agregat dan kualitas ikatan antarmuka berpotensi memengaruhi proses transfer tegangan antara agregat, pasta semen, dan serat ketika beton menerima pembebanan.

Dalam konteks validitas internal, pemeriksaan karakteristik agregat memberikan dasar untuk mengendalikan variasi material penyusun beton. Penggunaan jenis agregat yang sama pada seluruh variasi mendukung keterbandingan hasil pengujian. Meskipun demikian, keseragaman faktor air semen efektif, kelembapan agregat, dan komposisi aktual setiap adukan belum dapat dipastikan sepenuhnya berdasarkan dokumentasi penelitian. Oleh karena itu, perbedaan kinerja beton antarvariasi tidak dapat diatribusikan secara eksklusif kepada penambahan serat tanpa mempertimbangkan kemungkinan pengaruh variabel pengganggu tersebut.

Pengaruh Penambahan Serat terhadap Kemampuan Alir Beton SCC

Kemampuan alir merupakan parameter fundamental dalam mengevaluasi karakteristik beton SCC pada kondisi segar. Penambahan serat ke dalam matriks beton dapat mengubah interaksi antarpartikel, meningkatkan hambatan internal, dan memengaruhi kemampuan campuran dalam mengisi ruang cetakan. Ahmad et al. (2023) menjelaskan bahwa efektivitas penggunaan serat baja pada SCC dipengaruhi oleh keseimbangan antara kadar serat, proporsi agregat, faktor air semen, dan kemampuan alir campuran.

Berdasarkan pengamatan selama proses pencampuran, peningkatan kadar serat baja dan fiberglass menunjukkan kecenderungan penurunan kemampuan alir beton. Serat baja dengan panjang 25 mm berpotensi meningkatkan hambatan mekanis terhadap pergerakan agregat, sedangkan fiberglass dapat meningkatkan luas permukaan material yang harus dilapisi pasta semen. Pada campuran hibrida, interaksi kedua jenis serat berpotensi meningkatkan kompleksitas susunan internal campuran.

Kecenderungan tersebut dapat dijelaskan melalui mekanisme peningkatan gesekan internal dan pembentukan jaringan serat yang membatasi mobilitas partikel. Gencel et al. (2011) menunjukkan bahwa penambahan serat pada SCC perlu mempertimbangkan kemampuan pengerjaan dan distribusi serat dalam campuran. Simalti dan Singh (2021) juga mengevaluasi pengaruh serat baja daur ulang terhadap kemampuan pengisian, kemampuan melewati celah, dan karakteristik mekanis SCC, sehingga memperlihatkan pentingnya evaluasi terpadu terhadap beton segar dan beton keras.

Namun, penurunan kemampuan alir tidak selalu terjadi pada seluruh komposisi beton berserat. Alabdulkarim et al. (2024) menemukan bahwa penggunaan serat baja daur ulang pada beton SCC ringan tidak memberikan dampak negatif terhadap kemampuan alir pada komposisi yang mereka teliti. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pengaruh serat terhadap kemampuan pengerjaan sangat bergantung pada desain campuran dan karakteristik material.

Dalam penelitian ini, target *slump flow* ditetapkan sebesar 600–650 mm. Akan tetapi, nilai diameter penyebaran aktual untuk setiap variasi campuran tidak tersedia secara terperinci. Oleh karena itu, kecenderungan penurunan kemampuan alir hanya dapat dijelaskan secara kualitatif berdasarkan pengamatan selama pencampuran. Pemenuhan karakteristik SCC secara menyeluruh, khususnya kemampuan melewati celah dan ketahanan terhadap segregasi, belum dapat dipastikan.

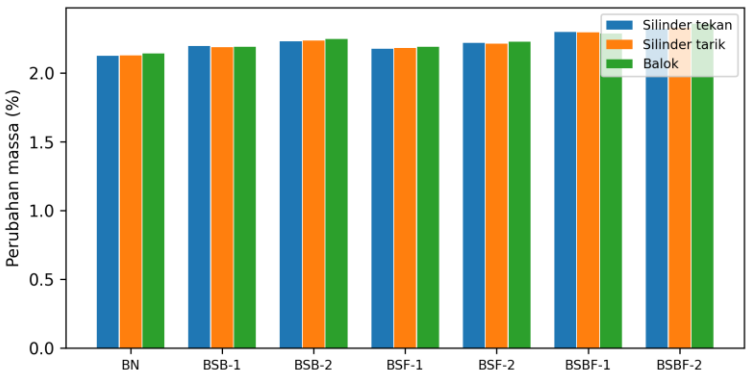
Pengaruh Penambahan Serat terhadap Perubahan Massa Akibat Perendaman

Perubahan massa setelah perendaman memberikan informasi mengenai respons fisik beton terhadap masuknya air selama proses perawatan. Berdasarkan hasil pengujian, seluruh variasi beton dengan penambahan serat menunjukkan persentase perubahan massa yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton kontrol. Kecenderungan tersebut ditemukan pada kelompok benda uji kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur.

Tabel 3. Perbandingan perubahan massa rata-rata benda uji setelah perendaman

Variasi	Silinder tekan (%)	Silinder tarik (%)	Balok (%)
BN	2,127	2,130	2,144
BSB-1	2,198	2,188	2,191
BSB-2	2,232	2,238	2,249
BSF-1	2,177	2,183	2,191
BSF-2	2,220	2,214	2,229
BSBF-1	2,299	2,297	2,288
BSBF-2	2,322	2,331	2,358

Hasil pengujian menunjukkan bahwa campuran hibrida dengan kadar serat 1,5% secara konsisten menghasilkan perubahan massa tertinggi pada ketiga kelompok benda uji. Dibandingkan dengan beton kontrol, peningkatan relatif pada variasi tersebut mencapai 9,17% untuk benda uji kuat tekan, 9,44% untuk benda uji kuat tarik belah, dan 9,98% untuk benda uji kuat lentur.



Gambar 7. Perbandingan perubahan massa benda uji setelah perendaman.

Peningkatan perubahan massa tersebut diduga berkaitan dengan bertambahnya luas zona antarmuka antara serat dan matriks semen. Keberadaan serat yang tidak terdistribusi secara homogen berpotensi menghasilkan rongga lokal yang memungkinkan masuknya air. Bentur dan Mindess (2007) menjelaskan bahwa karakteristik ikatan antara serat dan matriks menentukan efektivitas penguatan material komposit berbasis semen.

Selain itu, peningkatan hambatan aliran akibat penambahan serat dapat mengurangi kemampuan pasta semen dalam mengisi rongga antarmaterial. Zia et al. (2023), sebagaimana dirujuk dalam naskah awal, mengaitkan penggunaan serat baja daur ulang dengan perubahan karakteristik fisik dan kemampuan pengerjaan beton. Hal tersebut memberikan dasar untuk menduga adanya hubungan antara distribusi serat, homogenitas campuran, dan perubahan massa beton setelah perendaman.

Meskipun demikian, peningkatan perubahan massa tidak dapat secara langsung digunakan untuk menyimpulkan peningkatan porositas atau penurunan durabilitas beton. Prosedur penelitian menggunakan massa sebelum dan setelah perendaman selama perawatan, bukan massa kering oven sebagaimana diperlukan dalam pengujian penyerapan air standar ASTM C642. Oleh karena itu, hasil penelitian ini lebih tepat diinterpretasikan sebagai perubahan massa akibat perendaman daripada nilai daya serap air standar.

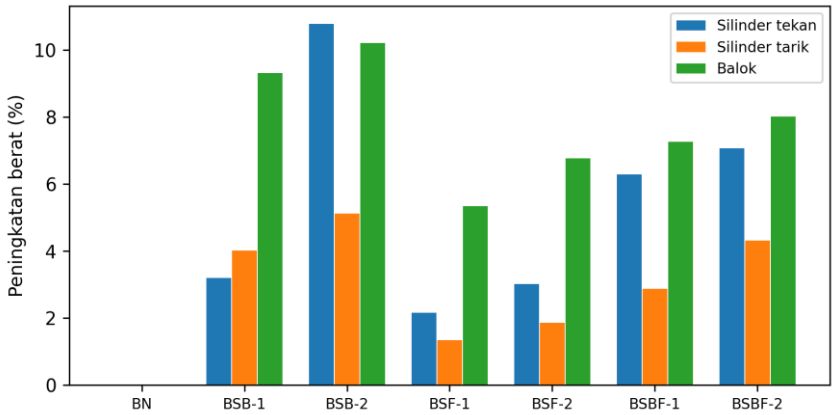
Pengaruh Penambahan Serat terhadap Berat Benda Uji Beton

Penambahan serat menghasilkan perubahan komposisi material yang berimplikasi terhadap massa beton. Hasil penimbangan menunjukkan bahwa seluruh variasi beton berserat memiliki berat rata-rata lebih tinggi dibandingkan dengan beton kontrol. Peningkatan terbesar ditemukan pada beton dengan penambahan serat baja sebesar 1,5%.

Tabel 4. Perbandingan berat rata-rata benda uji beton SCC

Variasi	Silinder tekan (kg)	Silinder tarik (kg)	Balok (kg)
BN	12,348	12,596	31,163
BSB-1	12,742	13,101	34,067
BSB-2	13,679	13,240	34,347
BSF-1	12,614	12,764	32,827
BSF-2	12,720	12,830	33,273
BSBF-1	13,125	12,957	33,427
BSBF-2	13,220	13,140	33,660

Penambahan serat baja sebesar 1,5% menghasilkan peningkatan berat sekitar 10,78% pada kelompok benda uji kuat tekan, 5,11% pada kelompok kuat tarik belah, dan 10,22% pada kelompok kuat lentur dibandingkan dengan beton kontrol.



Gambar 8. Persentase peningkatan berat benda uji terhadap beton kontrol

Peningkatan berat benda uji dapat dikaitkan dengan perbedaan massa jenis serat baja dan fiberglass serta penambahan jumlah material dalam campuran. Serat baja memiliki massa jenis yang lebih tinggi daripada serat kaca sehingga penggunaannya berpotensi meningkatkan massa komposit beton. Namun, besarnya peningkatan berat yang diperoleh tidak dapat sepenuhnya dijelaskan oleh massa serat tambahan tanpa mengetahui komposisi aktual campuran.

Alabdulkarim et al. (2024) melaporkan bahwa penambahan serat baja daur ulang tidak memberikan pengaruh negatif terhadap karakteristik densitas SCC ringan pada komposisi yang mereka gunakan. Perbedaan respons tersebut menunjukkan bahwa perubahan berat beton tidak hanya ditentukan oleh jenis serat, tetapi juga oleh volume agregat, porositas, kelembapan, dan komposisi matriks.

Dalam konteks aplikasi struktural, peningkatan berat beton perlu dipertimbangkan bersama peningkatan kapasitas mekanisnya. Beton dengan kekuatan tinggi dapat memberikan keuntungan struktural, tetapi peningkatan massa jenis berpotensi menambah beban mati. Karena penelitian ini menggunakan berat benda uji sebagai parameter pengamatan, evaluasi terhadap berat sendiri struktur masih memerlukan pengukuran massa jenis berdasarkan volume aktual dan kondisi kelembapan yang seragam.

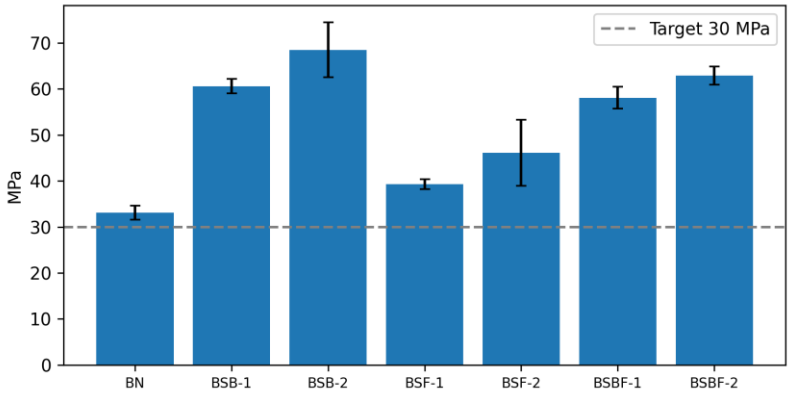
Pengaruh Penambahan Serat terhadap Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan beton pada umur 28 hari menunjukkan adanya perbedaan kapasitas mekanis berdasarkan jenis dan kadar serat yang digunakan. Beton kontrol menghasilkan kuat tekan rata-rata sebesar 33,107 MPa, atau sekitar 10,36% lebih tinggi dibandingkan dengan mutu beton rencana sebesar 30 MPa.

Seluruh variasi beton dengan penambahan serat menghasilkan kuat tekan rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton kontrol. Peningkatan tertinggi diperoleh pada campuran serat baja sebesar 1,5%, yaitu 68,465 MPa.

Tabel 5. Perbandingan kuat tekan beton SCC pada umur 28 hari

Variasi	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	Perubahan (%)
BN	33,107	1,551	0.00
BSB-1	60,585	1,550	83.00
BSB-2	68,464	5,958	106.80
BSF-1	39,308	1,091	18.73
BSF-2	46,109	7,215	39.28
BSBF-1	58,087	2,404	75.45
BSBF-2	62,890	1,961	89.96



Gambar 9. Kuat tekan rata-rata beton SCC dengan error bar ±SD.

Peningkatan kuat tekan pada campuran dengan serat baja dapat dijelaskan melalui mekanisme penghambatan perkembangan retak mikro. Meskipun beban utama berupa tegangan tekan, proses keruntuhan beton juga melibatkan perkembangan tegangan tarik lateral. Serat baja yang terdistribusi dalam matriks berpotensi membatasi perkembangan retakan melalui mekanisme *crack bridging* dan transfer tegangan.

Samarakoon et al. (2019) membahas potensi pemanfaatan serat baja hasil daur ulang ban dalam meningkatkan karakteristik mekanis beton. Efektivitas penguatan tersebut dipengaruhi oleh kualitas serat, ikatan serat dengan matriks, dan konfigurasi serat dalam campuran.

Hasil penelitian Simalti dan Singh (2021) menunjukkan bahwa serat baja hasil daur ulang dapat memberikan kinerja yang baik pada beton SCC, termasuk pada kadar 1,5% berdasarkan volume. Meskipun demikian, kesamaan kadar nominal tidak menunjukkan kesetaraan komposisi karena penelitian ini menggunakan persentase berdasarkan berat semen.

Sebaliknya, Alabdulkarim et al. (2024) menemukan bahwa penambahan serat baja daur ulang tidak memberikan perubahan terhadap kuat tekan SCC ringan, meskipun terdapat peningkatan kapasitas tarik. Perbedaan tersebut memperlihatkan bahwa kontribusi serat terhadap kuat tekan tidak bersifat universal dan dipengaruhi oleh karakteristik campuran beton.

Pada campuran fiberglass, peningkatan kuat tekan relatif lebih rendah dibandingkan dengan serat baja. Serat kaca berpotensi menghambat perkembangan retak berukuran kecil, tetapi efektivitasnya dipengaruhi oleh geometri, orientasi, kualitas ikatan, dan ketahanan terhadap lingkungan alkali matriks semen. Pada campuran hibrida, kuat tekan yang diperoleh lebih tinggi dibandingkan dengan fiberglass tunggal, tetapi belum melampaui serat baja tunggal pada kadar nominal yang sama.

Peningkatan kuat tekan sebesar 106,80% pada variasi BSB-2 merupakan hasil yang relatif besar sehingga memerlukan interpretasi kritis. Selain mekanisme penguatan serat, faktor air semen aktual, homogenitas campuran, luas penampang benda uji, ketepatan pembacaan beban, dan kondisi pengujian berpotensi memengaruhi hasil. Dengan tiga benda uji pada setiap variasi dan jumlah adukan independen yang belum terkonfirmasi, hasil tersebut menunjukkan kecenderungan empiris dalam kondisi eksperimen, tetapi belum membuktikan signifikansi statistik maupun keterulangan pada skala yang lebih luas.

Pengaruh Penambahan Serat terhadap Kuat Tarik Belah Beton

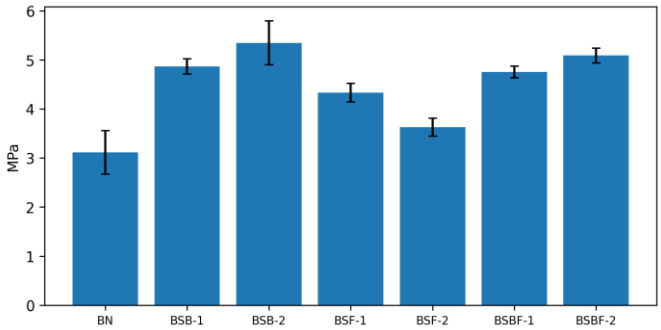
Kuat tarik belah merupakan parameter penting dalam mengevaluasi efektivitas serat sebagai material penguat matriks beton. Berbeda dengan pembebanan tekan, mekanisme penguatan pada pembebanan tarik berkaitan lebih langsung dengan kemampuan serat dalam menjembatani retakan dan mempertahankan transfer tegangan.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kuat tarik belah beton kontrol sebesar 3,115 MPa meningkat menjadi 5,346 MPa pada campuran serat baja sebesar 1,5%. Seluruh variasi serat menghasilkan kuat tarik belah rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton kontrol.

Tabel 6. Perbandingan kuat tarik belah beton SCC pada umur 28 hari

Variasi	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	Perubahan (%)
BN	3,115	0,442	0.00
BSB-1	4,864	0,153	56.12
BSB-2	5,345	0,448	71.58
BSF-1	4,329	0,190	38.95
BSF-2	3,626	0,182	16.40

Variasi	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	Perubahan (%)
BSBF-1	4,754	0,120	52.59
BSBF-2	5,089	0,152	63.34



Gambar 10. Kuat tarik belah rata-rata beton SCC dengan error bar ±SD.

Peningkatan kuat tarik belah pada campuran serat baja dapat dijelaskan melalui kemampuan serat dalam menghambat pembukaan dan perkembangan retakan. Ketika matriks beton mulai mengalami kerusakan, serat yang melintasi bidang retak berpotensi mempertahankan transfer tegangan antara kedua sisi retakan.

Mekanisme tersebut sesuai dengan konsep penguatan beton berserat yang dikemukakan oleh Naaman (2003), bahwa karakteristik geometris dan ikatan serat dengan matriks merupakan faktor penting dalam menentukan efektivitas penguatan.

Pawelska-Mazur dan Kaszynska (2021) juga membahas peningkatan karakteristik mekanis beton melalui pemanfaatan serat baja hasil daur ulang ban. Temuan tersebut mendukung potensi penggunaan material sekunder sebagai alternatif penguat beton.

Alabdulkarim et al. (2024) melaporkan peningkatan kuat tarik belah sebesar 38–76% pada SCC ringan dengan penambahan serat baja daur ulang. Peningkatan tersebut berada pada kisaran yang sebanding dengan hasil penelitian ini, yaitu 56,15% dan 71,62% pada campuran serat baja sebesar 1% dan 1,5%. Namun, perbedaan jenis beton dan dasar perhitungan kadar serat tetap perlu diperhatikan.

Temuan penting lainnya adalah penurunan kuat tarik belah pada campuran fiberglass ketika kadar serat ditingkatkan dari 1% menjadi 1,5%. Kuat tarik belah menurun dari 4,329 MPa menjadi 3,626 MPa, atau sekitar 16,24% terhadap campuran fiberglass 1%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kadar fiberglass tidak menghasilkan respons penguatan secara linier.

Penurunan tersebut diduga berkaitan dengan distribusi serat yang kurang homogen, peningkatan kebutuhan pasta semen, atau terbentuknya penggumpalan serat pada kadar yang lebih tinggi. Mohd Sam et al. (2014) membahas pentingnya evaluasi kemampuan pengerjaan dan sifat mekanis SCC dengan penguatan serat kaca. Meskipun demikian, mekanisme penggumpalan serat pada penelitian ini belum dapat dibuktikan karena distribusi serat dan mikrostruktur beton tidak diperiksa secara langsung.

Campuran hibrida menunjukkan peningkatan kuat tarik belah seiring dengan meningkatnya kadar serat, tetapi belum melampaui kinerja serat baja tunggal. Dengan demikian, penggunaan serat baja sebesar 1,5% memberikan kinerja tarik belah terbaik dalam rentang variasi yang diuji.

Pengaruh Penambahan Serat terhadap Kuat Lentur Beton

Kuat lentur beton menggambarkan kemampuan material dalam menerima pembebanan yang menghasilkan kombinasi tegangan tekan dan tarik. Penambahan serat berpotensi meningkatkan kapasitas lentur melalui mekanisme penghambatan perkembangan retak pada daerah tarik balok.

Berdasarkan pemeriksaan data beban maksimum dan dimensi benda uji, terdapat ketidaksesuaian satuan pada hasil kuat lentur dalam naskah awal. Nilai yang sebelumnya dilaporkan dalam MPa secara numerik menyerupai hasil perhitungan menggunakan satuan kgf/cm². Oleh karena itu, dilakukan konversi sementara menggunakan faktor 0,0980665 MPa per kgf/cm².

Konversi tersebut menghasilkan kuat lentur beton kontrol sebesar sekitar 3,463 MPa, sedangkan kuat lentur tertinggi diperoleh pada variasi serat baja 1,5%, yaitu sekitar 4,560 MPa.

Tabel 7. Perbandingan kuat lentur beton SCC pada umur 28 hari

Variasi	Rata-rata (MPa)	SD (MPa)	Perubahan (%)
BN	3,464	0,199	0.00
BSB-1	4,394	0,128	26.85
BSB-2	4,562	0,139	31.68
BSF-1	3,881	0,202	12.04
BSF-2	3,964	0,191	14.43
BSBF-1	4,294	0,079	23.96
BSBF-2	4,532	0,164	30.81

Peningkatan kuat lentur pada campuran beton berserat menunjukkan potensi kontribusi serat terhadap transfer tegangan setelah terbentuknya retakan pada daerah tarik balok. Serat baja berpotensi menjembatani retakan sehingga pembesaran retak dapat dihambat sebelum benda uji mencapai beban maksimum.

Mekanisme tersebut sesuai dengan kajian Banthia dan Gupta (2004), yang menjelaskan bahwa konfigurasi serat dalam komposit semen berperan terhadap respons lentur dan mekanisme penghambatan retak. Yoo dan Banthia (2016) juga menekankan bahwa efektivitas serat baja dalam meningkatkan karakteristik lentur dipengaruhi oleh ikatan serat–matriks, orientasi, geometri, dan kadar serat.

Campuran hibrida sebesar 1,5% menghasilkan peningkatan kuat lentur yang mendekati campuran serat baja tunggal sebesar 1,5%. Selisih kuat lentur berdasarkan hasil konversi sementara hanya sekitar 0,030 MPa. Perbedaan tersebut relatif kecil sehingga belum cukup untuk menyimpulkan keunggulan yang signifikan tanpa analisis statistik dengan struktur replikasi yang memadai.

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa penggunaan fiberglass bersama serat baja berpotensi memberikan mekanisme penguatan pada skala retakan yang berbeda. Namun, efek sinergis kedua jenis serat belum dapat dibuktikan secara meyakinkan karena tidak tersedia informasi terperinci mengenai proporsi individual serat dalam campuran hibrida, distribusi serat, serta respons beban–defleksi setelah keretakan.

Analisis Komprehensif Karakteristik Fisik dan Mekanis Beton SCC

Evaluasi komprehensif dilakukan dengan membandingkan karakteristik mekanis dan fisik seluruh variasi terhadap beton kontrol. Analisis tersebut bertujuan mengidentifikasi pola respons material serta kompromi antara peningkatan kekuatan beton dan perubahan karakteristik fisiknya.

Tabel 8. Sintesis perubahan karakteristik beton SCC terhadap beton kontrol

Variasi	Perubahan massa	Berat	Tekan	Tarik belah	Lentur*
BN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BSB-1	2.75	5.51	83.00	56.12	26.85
BSB-2	4.97	8.70	106.80	71.58	31.68
BSF-1	2.34	2.94	18.73	38.95	12.04
BSF-2	4.09	3.88	39.28	16.40	14.43
BSBF-1	7.55	5.47	75.45	52.59	23.96
BSBF-2	9.53	6.46	89.96	63.34	30.81

Hasil analisis memperlihatkan tiga pola utama. Pertama, peningkatan kadar serat baja dari 1% menjadi 1,5% secara konsisten diikuti oleh peningkatan kuat tekan, kuat tarik belah, dan kuat lentur. Kedua, peningkatan kadar fiberglass menghasilkan respons yang berbeda antarparameter mekanis, khususnya penurunan kuat tarik belah pada kadar 1,5%. Ketiga, penggunaan kombinasi serat baja dan fiberglass memberikan peningkatan karakteristik mekanis yang lebih tinggi dibandingkan dengan fiberglass tunggal, tetapi belum melampaui serat baja tunggal.

Pola tersebut memperlihatkan bahwa efektivitas penguatan tidak hanya ditentukan oleh persentase penambahan serat, tetapi juga oleh karakteristik intrinsik serat dan interaksinya dengan matriks beton. Simalti dan Singh (2021) menunjukkan bahwa penentuan komposisi serat pada SCC perlu mempertimbangkan karakteristik beton segar, mekanis, dan durabilitas secara bersamaan.

Berdasarkan seluruh parameter mekanis, campuran serat baja sebesar 1,5% merupakan variasi dengan kinerja tertinggi di antara komposisi yang diuji. Akan tetapi, peningkatan tersebut juga diikuti oleh peningkatan berat benda uji dan perubahan massa akibat perendaman.

Kondisi tersebut menunjukkan adanya kompromi (*trade-off*) antara peningkatan kapasitas mekanis dan karakteristik fisik beton. Oleh karena itu, variasi BSB-2 lebih tepat dinyatakan sebagai komposisi dengan kinerja

mekanis terbaik dalam penelitian ini, bukan sebagai komposisi SCC optimum secara universal. Penentuan kadar optimum memerlukan variasi kadar serat yang lebih luas, data beton segar yang lengkap, pengujian durabilitas, dan analisis optimasi multikriteria.

Implikasi Pemanfaatan Limbah Ban Bekas terhadap Pengembangan Beton Berkelanjutan

Pemanfaatan serat baja dari limbah ban bekas sepeda motor memberikan peluang pengembangan material konstruksi berbasis ekonomi sirkular. Proses pemisahan serat baja secara mekanis tanpa pembakaran memungkinkan komponen logam dalam ban bekas dimanfaatkan kembali sebagai bahan penguat beton.

Gupta et al. (2021) menjelaskan bahwa penggunaan material hasil samping industri dalam SCC dapat mendukung pengurangan ketergantungan terhadap sumber daya alam sekaligus membuka peluang pengembangan material konstruksi yang lebih berkelanjutan.

Pawelska-Mazur dan Kaszynska (2021) membahas potensi penggunaan serat baja hasil daur ulang ban sebagai alternatif terhadap serat baja industri. Simalti dan Singh (2021) juga menunjukkan bahwa pemanfaatan serat baja hasil pemisahan ban memiliki potensi keuntungan lingkungan dibandingkan dengan penggunaan serat baja manufaktur dalam kondisi produksi yang mereka kaji.

Temuan penelitian ini memperkuat potensi pemanfaatan limbah ban bekas sebagai bahan tambahan beton karena seluruh campuran serat baja menghasilkan peningkatan kapasitas mekanis dibandingkan dengan beton kontrol. Penggunaan material sekunder tersebut memberikan nilai tambah terhadap komponen limbah yang dapat dimanfaatkan kembali.

Namun, kontribusi lingkungan penelitian ini masih terbatas pada aspek pemanfaatan kembali material limbah. Penelitian belum melakukan pengukuran emisi karbon, konsumsi energi, biaya produksi, ataupun analisis siklus hidup (*Life Cycle Assessment*). Oleh karena itu, hasil penelitian belum dapat digunakan untuk menyimpulkan besarnya pengurangan dampak lingkungan secara kuantitatif.

Penelitian selanjutnya perlu diarahkan pada evaluasi kadar serat yang lebih luas, pengujian karakteristik reologi beton segar, pemeriksaan mikrostruktur, pengujian durabilitas jangka panjang, penilaian respons pascakeretakan, serta analisis dampak lingkungan. Pengembangan tersebut diperlukan untuk memastikan bahwa peningkatan kapasitas mekanis dapat dicapai tanpa mengorbankan kemampuan pemadatan mandiri dan kinerja jangka panjang beton.

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan serat baja dari limbah ban bekas sepeda motor dan serat *fiberglass* menunjukkan perubahan karakteristik fisik dan mekanis beton *Self-Compacting Concrete* (SCC). Seluruh variasi beton berserat menghasilkan peningkatan berat benda uji dan perubahan massa akibat perendaman dibandingkan dengan beton kontrol. Perubahan massa tertinggi diperoleh pada campuran kombinasi serat baja dan *fiberglass* sebesar 1,5%, dengan nilai berkisar antara 2,322–2,358%, sedangkan peningkatan berat benda uji tertinggi diperoleh pada campuran serat baja sebesar 1,5%. Berdasarkan analisis deskriptif komparatif, penambahan serat baja sebesar 1,5% menghasilkan kuat tekan dan kuat tarik belah rata-rata tertinggi, masing-masing sebesar 68,465 MPa dan 5,346 MPa, atau meningkat sebesar 106,80% dan 71,62% dibandingkan dengan beton kontrol. Variasi tersebut juga menunjukkan peningkatan kuat lentur tertinggi sebesar 31,69%. Sementara itu, peningkatan kadar *fiberglass* dari 1% menjadi 1,5% menyebabkan penurunan kuat tarik belah sebesar 16,24%, yang menunjukkan bahwa peningkatan kadar serat tidak selalu diikuti oleh peningkatan seluruh parameter mekanis. Secara keseluruhan, serat baja dari limbah ban bekas sepeda motor sebesar 1,5% menghasilkan kinerja mekanis rata-rata tertinggi di antara variasi yang diuji. Temuan ini menunjukkan potensi pemanfaatan limbah ban sebagai material penguat alternatif pada beton SCC. Namun, hasil tersebut masih terbatas pada perbandingan deskriptif. Penelitian selanjutnya perlu mempertimbangkan replikasi adukan independen, pengujian durabilitas, karakteristik reologi, homogenitas distribusi serat, serta optimasi komposisi campuran untuk memperoleh keseimbangan antara karakteristik fisik, mekanis, dan kemampuan alir beton.

Referensi

Ahmad, I. (2011). Analisis Perbedaan Kuat Tekan Beton Tambahan Abu Terbang Dengan Beton Normal Yang Direndam Dalam Asam Sulfat Untuk Beton Mutu Rendah. Konstruksia, 2(2), 1–8.

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*, Article 51. https://doi.org/10.1186/s40069-023-00602-7

Alabdulkarim, A., El-Sayed, A. K., Alsaif, A. S., Fares, G., & Alhozaimy, A. M. (2024). Behavior of lightweight self-compacting concrete with recycled tire steel fibers. *Buildings, 14*(8), 2463. https://doi.org/10.3390/buildings14082463

Alwie, rahayu deny danar dan alvi furwanti, Prasetio, A. B., Andespa, R., Lhokseumawe, P. N., & Pengantar, K. (2020). Tugas Akhir Tugas Akhir. Jurnal Ekonomi Volume 18, Nomor 1 Maret201, 2(1), 41–49.

Badan Standardisasi Nasional. (1991). SNI 03-2495-1991 Spesifikasi Bahan Tambahan pada Beton.

Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000 Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.

Badan Standardisasi Nasional. (2002a). SNI 06-0101-2002 Spesifikasi Teknis dan Persyaratan Mutu untuk Ban Sepeda Motor.

Badan Standardisasi Nasional. (2002b). Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung. SNI 03-2847-2002. In Bandung: Badan Standardisasi Nasional (p. 251).

Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1970:2008 Cara uji berat jenis dan penyerapan air agregat halus.

Badan Standardisasi Nasional. (2012). SNI 7656:2012 Tata Cara Pemilihan Campuran untuk Beton Normal, Beton Berat, Beton Massa. www.bsn.go.id

Badan Standardisasi Nasional. (2013). SNI 2847:2013 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung.

Badan Standardisasi Nasional. (2019). SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. In Bandung: Badan Standardisasi Nasional.

Badan Standardisasi Nasional. (2023). SNI 1974:2023 Metode Uji untuk Kekuatan Tekan Spesimen Beton Silinder.

Banthia, N., & Gupta, R. (2004). Hybrid fiber reinforced concrete (HyFRC): Fiber synergy in high strength matrices. *Materials and Structures, 37*, 707–716. https://doi.org/10.1007/BF02480518

Bentur, A., & Mindess, S. (2007). *Fibre reinforced cementitious composites* (2nd ed.). Taylor & Francis.

Brouwers, H. J. H., & Radix, H. J. (2005). Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research, 35*(11), 2116–2136. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.06.002

Dian Ardhiansyah, M. (2019). Pengaruh Pemanfaatan Sabut Kelapa Sebagai Material Serat Terhadap Kuat Tekan dan Daya Serap Beton. Jurnal Teknik Sipil, 1–10.

Dwi Ramayati, N., & Kartini, W. (2023). Pengaruh Penambahan Serat Fiberglass Pada Campuran Beton Terhadap Kinerja Beton. Agregat, 8(4), 948–952.

Dynamic compressive behaviour of recycled tyre steel fibre reinforced concrete. (2022). *Construction and Building Materials, 316*, 125896. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125896

EFNARC. (2005). *The European guidelines for self-compacting concrete: Specification, production and use*.

Ganta et al. (2020). Hybrid steel/glass fiber-reinforced self-consolidating concrete considering packing factor: Mechanical and durability characteristics. Penelusuran artikel.

Gea, P. M., Dohare, G. A., Zebua, M. K., Zebua, A. K., Zebua, D., & Ndruru, R. J. (2024). Pengaruh Penambahan Serat Baja Terhadap Kuat Tekan Beton Pada Berbagai Tingkat Kepadatan. Jurnal Ilmu Ekonomi, Pendidikan Dan Teknik, 1(1), 66–73. https://doi.org/10.70134/identik.v1i1.246

Gencel, O., Ozel, C., Brostow, W., & Martínez-Barrera, G. (2011). Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibres. *Materials Research Innovations, 15*(3), 216–225.

Gupta, N., Siddique, R., & Belarbi, R. (2021). Sustainable and greener self-compacting concrete incorporating industrial by-products: A review. *Journal of Cleaner Production, 284*, Article 124803. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124803

Herawati, Y. (2025). Populasi Kendaraan Nasional Naik 7 Juta Unit. Astera. https://www.viva.co.id/otomotif/1873305-populasi-kendaraan-nasional-naik-7-juta-unit#google_vignette

Kofifa. (2025). 7 Dampak Limbah Ban Bekas bagi Lingkungan. Asterra. https://www.asterra.id/artikel/limbah-ban-bekas/

Kurniati, D. (2024). Ketahanan Kuat Tekan Beton Serat Fiber Glass Sebagai Bahan Tambah. Jurnal Karkasa, 10(2), 39–44.

Lumingkewas, R. H. (2024). Inovasi Material untuk Infrastruktur Masa Depan. www.archdaily.com

Mechanical and durability performance of concrete with recycled tire steel fibers. (2023). *Construction and Building Materials, 394*, 132287. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132287

Mohd Sam, A. R., Mohamed, R. N., Ishak, M. Y., & Wong, C. S. (2014). Properties of glass fiber reinforced self compacting concrete. *Malaysian Journal of Civil Engineering, 26*(3), 382–396. https://doi.org/10.11113/mjce.v26.15898

Naaman, A. E. (2003). Engineered steel fibers with optimal properties for reinforcement of cement composites. *Journal of Advanced Concrete Technology, 1*(3), 241–252. https://doi.org/10.3151/jact.1.241

Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). Self-compacting concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology, 1*(1), 5–15. https://doi.org/10.3151/jact.1.5

Pawelska-Mazur, M., & Kaszynska, M. (2021). Mechanical performance and environmental assessment of sustainable concrete reinforced with recycled end-of-life tyre fibres. *Materials, 14*(2), 256. https://doi.org/10.3390/ma14020256

Rani, lskandar G. (2012). Pembuatan Beton Struktur Rumah Tinggal Aman Gempa dengan Memanfaatkan Agregat Lokal Sungai Limau Padang Pariaman.

Riana, N. (2022). Analisis Perbandingan Pengaruh Penambahan Serat Baja Karbon 3D Dramix dan Serat Kawat Bendrat terhadap Kuat Tekan, Kuat Tarik Belah, dan Kuat tarik Lentur pada Beton Mutu Normal. In Universitas Lampung.

Rusyandi, K., Mukodas, J., & Gunawan, Y. (2012). Perancangan Beton Self Compacting Concrete (Beton Memadat Sendiri) Dengan Penambahan Fly Ash dan Structuro. Jurnal Konstruksi, 10(01), 1–11. https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.10-01.35

Samarakoon, S. M. S. M. K., Ruben, P., Pedersen, J. W., & Evangelista, L. (2019). Mechanical performance of concrete made of steel fibers from tire waste. *Case Studies in Construction Materials, 11*, e00259. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00259

Samuel, U. P. (2021). Fiber Reinforced Polymer as a Reinforcing Material for Concrete. Jurnal Pendidikan Teknologi Dan Kejuruan, August, 41–48. https://doi.org/10.37304/balanga.v9i1.3276

Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science, 12*, 411–421. https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c

Sembiring, M. B. (2020). Inovasi Material Ramah Lingkungan untuk Kontruksi Bangunan Berkelanjutan. Jurnal Teknik Sipil, 12(2), 1–13.

Simalti, A., & Singh, A. P. (2021). Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials, 266*, 121102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121102

Simalti, A., & Singh, A. P. (2021). Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials, 266*, Article 121102. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121102

Simanjuntak, P. (2022). Pengembangan Teknologi Beton Kinerja Tinggi Yang Berkelanjutan. Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Dan Lingkungan, 4(1), 8–14.

Su, N., Hsu, K. C., & Chai, H. W. (2001). A simple mix design method for self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research, 31*(12), 1799–1807. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00566-X

Sustika Pratiwi, H. P. (2016). Kuat Tekan Beton Serat Menggunakan Variasi Fibre Optic dan Pecahan Kaca (Compressive Strength of Fibre Concrete Using Fibre Optic Variation and Glass Fracture). Jurnal Ilmiah Semesta Teknika, 19(1), 55–67.

Sutomo, Y. I. (2020). Studi Eksperimental Perilaku Pelat Beton Serat Baja diatas Pasir. Jurnal Teknik Sipil, 1–11.

Synergetic effects of hybrid steel and recycled tyre polymer fibres on workability, mechanical strengths and toughness of concrete. (2023). *Construction and Building Materials, 368*, 130421. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130421

Taufik, M. (2025). Pengaruh Penambahan Serat Baja Berasal dari Limbah Ban Motor yang Terbakar dan tidak Terbakar Terhadap Kuat Tekan dan Kuat Lentur Beton. Jurnal Teknik Sipil Dan Arsitektur, 30(2), 209–218.

Wahyudi, A. (2020). Pemanfaatan Abu Ampas Tebu Limbah Pabrik Gula Cinta Manis Kabupaten Ogan Ilir Sebagai Additive Beton. 17(1), 46–54. https://doi.org/10.31851/sainmatika.v17i1.3383

Wahyuni, Y. (2016). Karakteristik Beton dengan Penambahan Limbah Serat Nylon dan Polimer Concrete. Jurnal Teknik Sipil Siklus, 2, 24–33.

Yoo, D. Y., & Banthia, N. (2016). Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review. *Cement and Concrete Composites, 73*, 267–280. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.001

Yusra, A. (2020). Pengaruh Penambahan Serat Polypropylene pada Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi. https://doi.org/10.35308/jts-utu.v6i1.1750

Zulpanani, A., Sirait, T., Juarti, E. R., & Kusuma, Y. (2023). Tekan Dan Kuat Tarik Belah Pada Beton Normal. Jurnal Teknik Sipil, 25(2), 94–102.