

ECORAIL: INOVASI *SLEEPER* BETON BERBASIS SERAT KARET DAUR ULANG

Yenny Nurchasanah¹, Muhammad Ujjianto¹, Budi setiawan¹, Daffa Satria Hammam²

¹Progran Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

²Mahasiswa Progran Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Indonesia

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh substitusi agregat kasar dengan *fiber rubber* hasil pengolahan ban bekas terhadap sifat segar dan mekanik beton sleeper. Penelitian bersifat eksperimental dengan variasi substitusi 0% (NC), 5% (FR5%), dan 10% (FR10%) terhadap volume agregat kasar. Benda uji silinder ($\varnothing 150 \times 300$ mm) dan balok ($150 \times 150 \times 600$ mm) diuji setelah curing 28 hari untuk parameter slump, berat isi beton segar, kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan modulus elastisitas. Hasil menunjukkan peningkatan *workability*, nilai slump meningkat dari 36 mm (NC) menjadi 40 mm (FR5%) dan 43 mm (FR10%), sementara berat isi rata-rata berkurang dari 2424 kg/m³ (NC) menjadi 2248 kg/m³ (FR5%) dan 2118 kg/m³ (FR10%), akibat densitas karet yang lebih rendah dibandingkan agregat mineral. Sifat mekanik beton menurun signifikan dengan bertambahnya kadar *fiber rubber*: kuat tekan turun dari 54,93 MPa (NC) menjadi 15,95 MPa (FR5%) dan 10,69 MPa (FR10%); kuat tarik belah menurun dari 3,26 MPa menjadi 1,75 MPa dan 1,74 MPa; kuat lentur menurun dari 5,73 MPa menjadi 3,70 MPa dan 2,53 MPa; serta modulus elastisitas menurun dari 37.428 MPa menjadi 18.132 MPa dan 14.327 MPa untuk FR5% dan FR10%. Temuan ini mengindikasikan bahwa substitusi agregat kasar oleh *fiber rubber* meningkatkan kelecakan dan potensi daktilitas, namun secara substansial mengurangi kekuatan dan kekakuan beton, sehingga penggunaannya untuk elemen struktural seperti sleeper memerlukan pembatasan proporsi, perlakuan permukaan karet, atau strategi penguatan campuran agar kinerja struktural tetap terpenuhi.

Keywords: beton ramah lingkungan, kuat tekan, kuat lentur, limbah ban bekas, *sleeper* beton, serat karet

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan pesat infrastruktur transportasi menuntut ketersediaan material konstruksi yang tidak hanya memiliki kekuatan dan ketahanan tinggi, tetapi juga mendukung prinsip keberlanjutan lingkungan. Salah satu elemen krusial dalam sistem transportasi perkeretaapian adalah *sleeper* (bantalan rel), yang umumnya dibuat dari beton bertulang karena karakteristiknya yang memiliki kekuatan tekan besar serta ketahanan terhadap beban berulang. Namun, produksi beton dalam skala besar berimplikasi pada meningkatnya eksploitasi sumber daya alam, khususnya agregat kasar dan halus, serta tingginya emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari proses produksi semen.

Sementara itu, limbah padat seperti ban bekas terus meningkat seiring pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor. Ban bekas yang sulit terurai secara alami menjadi salah satu sumber pencemaran lingkungan yang signifikan. Pengelolaan limbah ban yang masih terbatas pada pembakaran terbuka atau penimbunan di tempat pembuangan akhir (TPA) berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan inovasi dalam pemanfaatan limbah ban agar dapat dialihkan menjadi bahan konstruksi alternatif yang berkelanjutan dan bernilai guna tinggi (Czarna-Juszkiewicz et al., 2023)(Goevert, 2024)(Kolendo et al., 2024)(US Tire Manufacturers Association, 2023)(Berger, 2023).

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa serat karet yang berasal dari ban bekas memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran beton. Penambahan serat karet tersebut dilaporkan mampu meningkatkan daktilitas, ketahanan terhadap retak, serta kemampuan redaman getaran pada beton. Karakteristik ini sangat relevan untuk diaplikasikan pada sleeper beton, yang secara kontinu menerima beban dinamis akibat lintasan kereta api. Meski demikian, masih diperlukan kajian eksperimental yang komprehensif untuk menilai secara kuantitatif pengaruh penambahan serat karet terhadap sifat mekanik beton, guna memastikan kelayakannya sebagai material *sleeper* (Mohamed et al., 2024)(Mim et al., 2025)(Pham et al., 2024; Siahkouhi et al., 2022; Singaravel et al., 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat karet dari limbah ban bekas terhadap sifat

mekanik beton *sleeper*, terutama pada parameter kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan modulus elastisitas. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap pengembangan material konstruksi yang lebih ramah lingkungan, sekaligus mendukung upaya pengelolaan limbah ban secara produktif dan berkelanjutan dalam industri konstruksi.

2. METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat karet yang berasal dari limbah ban bekas terhadap sifat mekanik beton yang digunakan sebagai material *sleeper* perkeretaapian. Variasi kadar serat karet yang digunakan terdiri atas tiga tingkat, yaitu 0% (beton normal), 5%, dan 10% dari volume agregat kasar. Pemilihan variasi ini bertujuan untuk mengidentifikasi batas optimum penambahan serat karet terhadap performa mekanik beton.

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen Portland tipe I sebagai bahan pengikat, pasir sebagai agregat halus, kerikil sebagai agregat kasar, air sebagai bahan pencampur, serta serat karet hasil cacahan ban bekas sebagai bahan tambahan. Serat karet diperoleh melalui proses pencacahan manual limbah ban bekas menjadi potongan berukuran ± 5 mm. Benda uji yang digunakan terdiri dari silinder beton berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm, untuk pengujian kuat tekan dan kuat tarik belah dan balok beton berukuran 150 mm \times 150 mm \times 600 mm, untuk pengujian kuat lentur.

Perancangan campuran beton dilakukan berdasarkan metode perancangan campuran menurut SNI 7656:2012, dengan penyesuaian pada volume agregat kasar yang digantikan oleh serat karet sesuai dengan variasi yang ditetapkan. Rasio air terhadap semen (*w/c ratio*) dijaga konstan untuk menjaga konsistensi *workability* antar variasi. Proses pencampuran bahan dilakukan menggunakan molen beton mekanis untuk menjamin homogenitas campuran. Pengecoran dilakukan ke dalam cetakan baja standar yang telah dilumasi minyak agar mudah dilepaskan setelah pengerasan awal. Setelah 24 jam, benda uji dilepaskan dari cetakan dan kemudian direndam dalam air bersih selama 28 hari untuk proses *curing*, sesuai standar pengujian beton.

Setelah proses perawatan selesai, benda uji diuji di Laboratorium Mekanika Bahan dengan parameter sebagai berikut:

- Kuat tekan, diuji menggunakan mesin uji tekan hidrolik sesuai SNI 1974:2011.
- Kuat tarik belah, diuji berdasarkan SNI 03-2491-2002.
- Kuat lentur, diuji menggunakan metode *third point loading* sesuai SNI 03-4431-1997.
- Modulus elastisitas, dihitung secara empiris dari hasil kuat tekan rata-rata sesuai pendekatan standar SNI 2847:2019.

Setiap pengujian dilakukan dengan tiga spesimen pada setiap variasi campuran untuk memastikan reliabilitas data dan meminimalkan kesalahan eksperimental.

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan nilai kuat tekan, kuat tarik belah, kuat lentur, dan modulus elastisitas antar variasi penambahan serat karet. Analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi tren perubahan sifat mekanik akibat substitusi agregat kasar dengan serat karet. Hasil analisis kemudian dievaluasi terhadap standar kinerja beton struktural untuk menentukan kelayakan penggunaan beton berserat karet sebagai material alternatif *sleeper* perkeretaapian yang lebih ramah lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian terhadap beton mutu tinggi dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik beton baik pada kondisi segar maupun pada kondisi setelah pengerasan. Pada tahap beton segar, dilakukan uji kelecakan (*slump test*) guna menilai kemampuan kerja (*workability*) campuran beton serta pengujian berat isi untuk mengetahui kerapatan campuran yang terbentuk. Tahap ini penting untuk memastikan homogenitas dan kestabilan proporsi campuran sebelum proses pengerasan berlangsung.

Selanjutnya, pada tahap beton keras dilakukan serangkaian pengujian yang mencakup kuat tekan, kuat lentur, dan daya serap air (absorpsi). Pengujian kuat tekan digunakan untuk menentukan kapasitas beton dalam menahan beban aksial, sedangkan pengujian kuat lentur bertujuan mengevaluasi kemampuan beton dalam menahan beban tarik tidak langsung akibat momen lentur. Sementara itu, pengujian absorpsi dilakukan untuk menilai kepadatan mikrostruktur

dan tingkat porositas beton, yang berhubungan erat dengan durabilitas dan ketahanan terhadap penetrasi air maupun zat agresif lainnya.

Hasil dari keseluruhan pengujian tersebut disajikan dan dianalisis untuk menggambarkan pengaruh parameter campuran terhadap kinerja mekanik dan karakteristik fisik beton mutu tinggi, sehingga dapat diperoleh pemahaman menyeluruh mengenai perilaku material pada kedua kondisi tersebut.

Slump Test

Pengujian *slump test* dilakukan untuk menilai tingkat *workability* dan homogenitas campuran beton pada kondisi segar sebelum dituangkan ke dalam cetakan (bekisting). Nilai slump yang direncanakan pada penelitian ini berada dalam kisaran 25–150 mm, sesuai dengan standar umum untuk beton struktural. Hasil pengujian slump untuk setiap variasi campuran disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Hasil Uji Slump Test

Jenis Beton	Hasil Uji Slump Test (mm)
NC	36,00
FR5%	40,00
FR10%	43,00

Dari hasil pengujian diperoleh bahwa beton normal (NC) memiliki nilai slump sebesar 36 mm, sedangkan campuran dengan penambahan serat karet 5% (FR5%) dan 10% (FR10%) masing-masing menunjukkan nilai slump 40 mm dan 43 mm. Seluruh nilai slump tersebut masih berada dalam rentang *slump* yang direncanakan (25–50 mm), sehingga dapat disimpulkan bahwa seluruh campuran memenuhi kriteria kelecakan yang dipersyaratkan untuk beton mutu tinggi.

Peningkatan nilai *slump* seiring dengan bertambahnya kadar serat karet menunjukkan bahwa penambahan serat karet (*fiber rubber*) dapat meningkatkan *workability* beton. Fenomena ini diduga disebabkan oleh sifat elastis dan permukaan licin partikel karet, yang mengurangi gesekan antar agregat dalam campuran, sehingga campuran menjadi lebih mudah dikerjakan. Selain itu, serat karet memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan agregat kasar, sehingga meningkatkan mobilitas partikel dalam adukan beton.

Secara keseluruhan, hasil pengujian ini menunjukkan bahwa penggunaan serat karet hingga 10% volume agregat kasar tidak menurunkan kelecakan beton, bahkan berpotensi memperbaiki kemampuan alir tanpa memerlukan peningkatan faktor air-semen (*water-cement ratio*). Temuan ini mengindikasikan bahwa substitusi sebagian agregat kasar dengan serat karet dapat diterapkan tanpa mengorbankan kemudahan pengerjaan (*workability*) campuran beton.

Berat isi beton

Pengujian berat isi beton dilakukan untuk menentukan densitas beton pada kondisi mengeras, yang mencerminkan tingkat kepadatan dan homogenitas campuran. Pengujian ini menggunakan benda uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, serta benda uji berbentuk balok berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm. Pengujian dilakukan pada umur 14 hari dan 28 hari, sebelum dilanjutkan dengan pengujian kuat tekan. Prosedur pengujian meliputi penimbangan berat total benda uji dan perhitungan volume berdasarkan dimensi geometris cetakan, untuk kemudian dihitung berat isi beton dalam satuan kg/m³. Hasil pengujian disajikan pada **Tabel 2**.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa berat isi tertinggi diperoleh pada campuran beton normal (NC), baik untuk sampel silinder maupun balok, sedangkan nilai terendah ditemukan pada campuran dengan penambahan serat karet 10% (FR10%). Penurunan berat isi beton seiring meningkatnya kadar serat karet menunjukkan bahwa penambahan serat karet dari limbah ban bekas cenderung menurunkan densitas beton.

Tabel 2. Hasil Uji Berat Isi Beton

Benda Uji	Jenis Sampel	Volume Beton (m ³)	Berat Beton (kg)	Berat Isi Beton (kg/m ³)
Silinder	NC	0,0053	12,71	2.398

Balok	FR5%	0,0135	11,86	2.238
	FR10%		11,67	2.203
	NC		33,07	2.449
	FR5%		30,50	2.259
	FR10%		27,47	2.035

Fenomena ini terjadi karena berat jenis karet ban (sekitar 1,1–1,2 g/cm³) jauh lebih rendah dibandingkan agregat kasar alami (sekitar 2,6–2,7 g/cm³). Akibatnya, semakin besar proporsi serat karet yang menggantikan agregat kasar, semakin rendah pula berat isi campuran yang dihasilkan. Selain itu, permukaan karet yang tidak berpori dan cenderung hidrofobik dapat mengurangi ikatan pasta semen terhadap agregat, yang juga berpengaruh terhadap kepadatan mikrostruktural beton (Ahmad et al., 2022; El-Nemr & Shaaban, 2024; Kara De Maeijer et al., 2021).

Secara umum, penurunan berat isi ini tidak selalu berdampak negatif, karena dalam beberapa kasus beton ringan dengan kerapatan lebih rendah dapat memberikan keuntungan dari segi efisiensi beban struktur, ketahanan termal, dan reduksi suara. Namun demikian, perlu diperhatikan bahwa penurunan densitas juga dapat memengaruhi kekuatan mekanik, sehingga harus dikompensasi dengan optimasi komposisi campuran dan perlakuan curing yang tepat.

Kuat tekan silinder beton

Setelah proses perawatan (*curing*) selama 28 hari, dilakukan pengujian kuat tekan terhadap benda uji berbentuk silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat karet dari limbah ban bekas terhadap kekuatan tekan beton. Setiap variasi komposisi diuji menggunakan tiga sampel dengan target kuat tekan rencana sebesar 43 MPa, dan pengujian dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) sesuai dengan ketentuan SNI 1974:2011.

Tabel 3. Hasil Uji Kuat Tekan Beton

Benda Uji	Kuat Tekan (MPa)
NC	54,93
FR5%	15,95
FR10%	10,69

Hasil pengujian pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa nilai kuat tekan beton menurun secara signifikan seiring meningkatnya kadar serat karet yang ditambahkan. Beton normal (NC) memiliki kuat tekan rata-rata sebesar 54,93 MPa, sedangkan pada campuran dengan penambahan 5% serat karet (FR5%) kekuatannya menurun drastis menjadi 15,95 MPa, dan semakin turun menjadi 10,69 MPa pada penambahan 10% serat karet (FR10%).

Penurunan kuat tekan tersebut dapat dikaitkan dengan sifat fisik dan kimia dari karet ban, yang memiliki berat jenis lebih rendah, permukaan halus, serta sifat non-polar yang menyebabkan adhesi antara pasta semen dan partikel karet menjadi lemah. Akibatnya, terbentuk zona antarmuka yang rapuh (*interfacial transition zone/ITZ*), yang menjadi titik awal keretakan ketika beban tekan meningkat. Selain itu, karet juga bersifat elastis dan mudah terdeformasi, sehingga menurunkan kemampuan beton dalam menahan beban tekan tinggi.

Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya oleh Erik Riatmojo (2023) yang menyatakan bahwa beton dengan substitusi crumb rubber menunjukkan penurunan kekuatan tekan hingga sekitar 12% dibandingkan beton normal dengan mutu 25 MPa (Riatmojo et al., 2023). Studi lain oleh Kara De Maeijer (2021) dan Enkaiki (2024) juga melaporkan bahwa peningkatan proporsi karet menyebabkan penurunan kekuatan tekan hingga 50–80% tergantung pada ukuran partikel dan proporsi pengantiannya (Kara De Maeijer et al., 2021)(Enkaiki et al., 2024).

Secara keseluruhan, hasil ini memperlihatkan bahwa penambahan serat karet dalam campuran beton berpotensi menurunkan kekuatan tekan, terutama jika digunakan dalam proporsi tinggi. Namun demikian, beton dengan tambahan karet tetap memiliki keunggulan tertentu, seperti peningkatan daktilitas, ketahanan terhadap retak mikro, serta kemampuan redaman getaran, yang menjadikannya berpotensi untuk aplikasi non-struktural atau elemen yang membutuhkan daya lentur tinggi seperti bantalan rel (*sleeper*) perkeretaapian.

Kuat tarik belah silinder beton

Pengujian kuat tarik belah (*splitting tensile strength*) pada beton bertujuan untuk menentukan kemampuan beton menahan gaya tarik tidak langsung yang muncul akibat beban eksternal atau internal, termasuk untuk mencegah retak di masa pakai struktur. Parameter ini penting sebagai indikator integritas beton dalam kondisi kurang ideal (misalnya ketika beton mengalami beban tarik akibat lenturan, lateral, atau perubahan suhu), dan sering digunakan sebagai komponen evaluasi mutu beton dalam aplikasi konstruksi serta sebagai korelasi terhadap perilaku retak pada elemen struktural.

Dalam penelitian ini, pengujian kuat tarik belah dilakukan pada benda uji berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm, yang telah menjalani proses curing selama 28 hari. Pengujian menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai standar SNI yang berlaku. Hasil uji tarik belah disajikan dalam **Tabel 4**, yang menunjukkan nilai-nilai berikut:

Tabel 4. Hasil Uji Kuat Tarik Belah Beton

Benda Uji	Kuat Tarik Belah (MPa)
NC	3,26
FR5%	1,75
FR10%	1,74

Data ini menunjukkan bahwa beton normal memiliki nilai tarik belah rata-rata 3,26 MPa, sementara penambahan serat karet sebanyak 5% dan 10% menyebabkan penurunan kekuatan tarik belah yang cukup signifikan (sekitar 46–47%). Penurunan tersebut menunjukkan bahwa substitusi agregat atau aditif dengan bahan elastis seperti karet cenderung memperlemah ikatan antara partikel agregat dengan matriks semen, sehingga bercampur dengan faktor porositas yang meningkat dan distribusi cacat mikro yang lebih besar.

Penelitian terdahulu mendukung temuan ini. Misalnya, dalam studi “*Fibrous Rubberized Concrete*” (2022), dikemukakan bahwa penambahan *fibrous rubber* secara berimbang menggantikan agregat halus menyebabkan penurunan *splitting tensile strength* sebesar 10,11% hingga 23,67%, tergantung jenis karet dan volumetrik substitusi (Li et al., 2025). Selain itu, studi *Investigation of Strength Properties for Concrete Containing Fine-Rubber Particles Using UPV* (2022) menunjukkan bahwa beton dengan penggantian fine aggregate oleh rubber 10%, 20%, dan 30% mengalami penurunan kuat tarik belah masing-masing sekitar 9%, 30%, dan 37% dibanding beton kontrol pada umur 28 hari (Choi et al., 2022).

Berkaca pada hasil-hasil ini dan data penelitian terkini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan serat karet dalam proporsi tinggi tidak dianjurkan jika kuat tarik belah menjadi salah satu syarat mutu penting, kecuali bila dilakukan optimasi tambahan, misalnya perlakuan permukaan karet, penggunaan serat bantu (*fiber*), atau peningkatan *curing*.

Modulus elastisitas silinder beton

Pengujian modulus elastisitas (E_t) dilakukan secara bersamaan dengan pengujian kuat tekan pada umur 28 hari menggunakan benda uji silinder berdiameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Pengujian dilakukan dengan penggunaan *Compression Testing Machine* (CTM) sesuai prosedur standar (misalnya SK-SNI-T-15-1991 atau standar internasional analog), memakai pengukuran tegangan dan regangan dalam zona elastis dari kurva tegangan-regangan. Nilai modulus elastisitas dihitung dari rasio tegangan terhadap regangan dalam batas proporsional, kemudian dikalkulasi menggunakan formula standar yang mempertimbangkan faktor geometri dan kondisi pengujian.

Tabel 5. Hasil Uji Modulus Elastisitas Beton

Benda Uji	Modulus Elastisitas (MPa)
NC	37.427,85
FR5%	18.132,48
FR10%	14.327,06

Pada **Tabel 5**, hasil pengujian menunjukkan bahwa beton normal (NC) memiliki modulus elastisitas tertinggi (37.428 MPa), sedangkan penambahan serat karet 5% dan 10% menyebabkan penurunan modulus yang signifikan,

masing-masing menjadi 18.132 MPa dan 14.327 MPa. Penurunan nilai ini menggambarkan bahwa substitusi agregat atau penambahan material elastis seperti karet melemahkan kekakuan beton.

Penurunan modulus elastisitas ini terutama disebabkan oleh kontras sifat material antara karet dan matriks beton. Menurut Du (2024), modulus elastisitas beton jauh lebih besar, sekitar 5.000 hingga 24.000 kali modulus karet, sehingga penambahan karet menyebabkan distribusi deformasi yang tidak merata dan mempercepat terbentuknya zona lemah di antar muka (ITZ) (Du et al., 2024). Selain itu, studi klasik oleh Sherbini (2025) menyebutkan bahwa dengan bertambahnya kandungan karet, baik kekuatan tekan maupun modulus elastisitas beton menurun. Penurunan kekakuan (modulus) disertai peningkatan daktilitas menjadi salah satu trade-off dari substitusi karet dalam beton (Sherbini & El-Mal, 2025).

Dengan demikian, berdasarkan data dan literatur, dapat disimpulkan bahwa meskipun penambahan serat karet dapat memberikan keuntungan dalam hal kapasitas redaman atau deformabilitas, hal tersebut tidak meningkatkan modulus elastisitas rata-rata beton, melainkan justru menurunkannya signifikan. Karena modulus elastisitas mencerminkan seberapa “kaku” material terhadap deformasi elastis sementara, karakter karet yang bersifat lebih lunak dan mudah meregang menjadi faktor penghambat pencapaian modulus yang tinggi.

Kuat lentur balok *sleeper*

Pengujian *kuat lentur (flexural strength)* dilakukan pada balok sleeper berukuran 150 mm × 150 mm × 600 mm, di mana setiap variasi komposisi diuji minimal dengan dua sampel. Setelah proses perawatan curing selama 28 hari, balok diuji lentur dengan beban yang diaplikasikan secara bertahap hingga kegagalan lentur tercapai. Nilai kekuatan lentur untuk tiap sampel dicatat dan disusun dalam **Tabel 6**.

Tabel 6. Hasil Uji Kuat Lentur Balok Beton *Sleeper*

Benda Uji	Kuat Lentur (MPa)
NC	5,73
FR5%	3,70
FR10%	2,53

Data menunjukkan bahwa beton normal memiliki kekuatan lentur tertinggi, sementara substitusi serat karet sebanyak 5% dan 10% menyebabkan penurunan yang signifikan terhadap kekuatan lentur sekitar 35—56 % dibanding beton kontrol. Penurunan ini dapat dijelaskan oleh beberapa faktor: serat karet yang lebih lentur dan kurang kaku dibanding agregat mineral menyebabkan distribusi tegangan lentur yang tidak ideal, munculnya zona antarmuka (*interfacial transition zone*, ITZ) yang lemah, dan potensi peningkatan porositas serta gelembung udara dalam campuran.

Penelitian terdahulu mendukung temuan ini. Sebagai contoh, studi “*Assessment of Flexural and Compressive Strengths in Concrete Utilizing Replacement of Coarse Aggregates with Rubber*” oleh Federico (2023) menemukan bahwa penggantian agregat kasar dengan karet akan menurunkan kekuatan lentur seiring dengan meningkatnya proporsi rubber, meskipun workability meningkat (Aves, Federico A Jr., 2023). Selain itu, dalam artikel “*A Comprehensive Evaluation of the Mechanical Properties of Rubberized Concrete*” dilaporkan bahwa substitusi agregat halus dengan crumb rubber menyebabkan penurunan kekuatan lentur yang konsisten, dengan efek penurunan lebih nyata bila kandungan karet melebihi 10% karena lemahnya kohesi antara matriks semen dan partikel karet (Fadiel et al., 2023).

Berdasarkan hasil eksperimen ini dan literatur, dapat disimpulkan bahwa meskipun penambahan serat karet memiliki keuntungan seperti peningkatan elastisitas lokal atau efek redaman, penggunaan substitusi yang lebih tinggi pada balok akan mengurangi kekuatan lentur secara signifikan. Oleh karena itu, untuk aplikasi *sleeper* yang memerlukan kekuatan lentur yang memadai (terutama di lintasan kereta api yang mengalami momen lentur tinggi) perlu dilakukan optimasi, misalnya melalui penggunaan partikel karet berukuran lebih halus, pre-perlakuan permukaan karet, peningkatan volume semen atau aditif pozzolanik, atau kombinasi serat lain untuk memperbaiki ikatan antar-material.

4. PENUTUP

Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh penambahan serat karet (*fiber rubber*) yang berasal dari limbah ban bekas terhadap sifat mekanik beton *sleeper*, dengan variasi substitusi sebesar 0%, 5%, dan 10% terhadap volume agregat kasar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan *fiber rubber* memberikan efek terhadap perilaku fisis dan mekanik beton, baik pada kondisi beton segar maupun beton keras.

1. Hasil pengujian beton segar menunjukkan bahwa penambahan serat karet (*fiber rubber*) meningkatkan nilai slump, yang menandakan adanya peningkatan workability akibat sifat elastis serat karet yang mengurangi gesekan antar partikel dalam campuran. Namun, berat isi beton mengalami penurunan seiring meningkatnya kadar serat karet karena massa jenis karet yang lebih ringan dibandingkan agregat alami.
2. Pada pengujian kuat tekan, terjadi penurunan kekuatan yang cukup signifikan dengan bertambahnya kadar *fiber rubber*. Hal ini disebabkan oleh melemahnya ikatan antar muka antara pasta semen dan partikel karet yang bersifat tidak menyerap air, sehingga transfer beban dalam beton menjadi kurang efektif.
3. Hasil kuat tarik belah juga menunjukkan tren penurunan, di mana peningkatan kandungan serat karet menyebabkan menurunnya daya ikat antar partikel dalam matriks beton. Kondisi ini memperlihatkan bahwa beton dengan serat karet memiliki kemampuan menahan tegangan tarik yang lebih rendah dibanding beton normal.
4. Pengujian kuat lentur memperlihatkan bahwa penambahan serat karet menurunkan kekuatan lentur beton *sleeper*. Penurunan ini diakibatkan oleh rendahnya kekakuan partikel karet yang menyebabkan terbentuknya zona lemah pada bidang retak, meskipun beton menjadi lebih elastis dan tahan terhadap deformasi.
5. Pada modulus elastisitas, nilai yang dihasilkan menurun seiring bertambahnya kadar serat karet, menunjukkan bahwa beton menjadi lebih lentur namun kurang kaku. Hal ini mengindikasikan bahwa meskipun serat karet meningkatkan kemampuan deformasi dan energi serap, beton menjadi kurang efisien untuk aplikasi struktural yang memerlukan kekakuan tinggi.
6. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa penambahan serat karet dari limbah ban bekas memberikan efek positif terhadap sifat kelecakan dan daktilitas beton, namun menurunkan hampir seluruh parameter kekuatan mekanik. Oleh karena itu, penggunaannya sebaiknya dibatasi pada proporsi rendah untuk menjaga keseimbangan antara performa struktural dan aspek keberlanjutan material.

Rekomendasi

1. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disarankan agar penelitian lanjutan difokuskan pada beberapa aspek untuk memperoleh kinerja beton yang lebih optimal. Pertama, perlu dilakukan eksplorasi terhadap **modifikasi permukaan serat karet** menggunakan bahan kimia atau perlakuan mekanis untuk meningkatkan daya lekat antara partikel karet dan pasta semen, sehingga dapat meminimalkan penurunan kekuatan mekanik.
2. Penelitian berikutnya sebaiknya mengevaluasi **penggunaan kombinasi serat karet dengan bahan tambahan lain**, seperti *silica fume*, *fly ash*, atau serat sintetis (*polypropylene*, *basalt*, atau *steel fiber*), guna menghasilkan campuran beton yang memiliki keseimbangan antara kekuatan, keuletan, dan keberlanjutan lingkungan.
3. Perlu dilakukan **analisis mikrostruktural** menggunakan metode seperti SEM atau XRD untuk memahami mekanisme interaksi antara serat karet dan matriks semen pada tingkat mikro. Hasil ini diharapkan dapat memberikan penjelasan ilmiah terhadap penurunan kuat tekan, tarik, maupun modulus elastisitas yang terjadi.
4. Penelitian lebih lanjut dapat mempertimbangkan **pengaruh variasi ukuran, bentuk, dan distribusi serat karet**, serta kondisi perawatan (*curing*) yang berbeda terhadap sifat mekanik dan durabilitas beton. Terakhir, disarankan agar dilakukan **uji performa jangka panjang** terhadap beton yang mengandung serat karet, termasuk ketahanan terhadap siklus beku-cair, serangan sulfat, dan karbonasi, untuk memastikan kelayakannya pada aplikasi struktural dan non-struktural.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, J., Zhou, Z., Majdi, A., Alqurashi, M., & Deifalla, A. F. (2022). Overview of Concrete Performance Made with Waste Rubber Tires: A Step toward Sustainable Concrete. *Materials*, 15(16). <https://doi.org/10.3390/ma15165518>
- Aves, Federico A Jr. (2023). Assessment of Flexural and Compressive Strengths in Concrete Utilizing Replacement of Coarse Aggregates with Rubber. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 965–973. <https://doi.org/10.48175/ijarsct-12337>
- Berger, L. (2023). *California Waste Tire Market Report : 2023. June*. <http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/Documents/1532%5C20151532.pdf>
- Choi, Y., Kim, I., Lim, H., & Cho, C. (2022). Fine-Rubber Particles Using UPV. *Materials*, 15, 3542.
- Czarna-Juszkiewicz, D., Kunecki, P., Cader, J., & Wdowin, M. (2023). Review in Waste Tire Management—Potential Applications in Mitigating Environmental Pollution. *Materials*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/ma16175771>
- Du, T., Yang, Y., Cao, H., Si, N., Kordestani, H., Sktani, Z. D. I., Arab, A., & Zhang, C. (2024). Rubberized Concrete: Effect of the Rubber Size and Content on Static and Dynamic Behavior. *Buildings*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/buildings14061541>
- El-Nemr, A., & Shaaban, I. G. (2024). Assessment of Special Rubberized Concrete Types Utilizing Portable Non-Destructive Tests. *Ndt*, 2(3), 160–189. <https://doi.org/10.3390/ndt2030010>
- Enkaiki, L., Jarachi, O., Mihai, P., & Moustachi, O. E. K. (2024). Experimental Analysis of Rubberized Concrete Under Compression Test. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 72(7), 198–206. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V72I7P121>
- Fadiel, A. A. M., Mohammed, N. S., Abu-Lebdeh, T., Munteanu, I. S., Niculae, E., & Petrescu, F. I. T. (2023). A Comprehensive Evaluation of the Mechanical Properties of Rubberized Concrete. *Journal of Composites Science*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/jcs7030129>
- Goevert, D. (2024). The value of different recycling technologies for waste rubber tires in the circular economy—A review. *Frontiers in Sustainability*, 4. <https://doi.org/10.3389/frsus.2023.1282805>
- Kara De Maeijer, P., Craeye, B., Blom, J., & Bervoets, L. (2021). Crumb rubber in concrete—the barriers for application in the construction industry. *Infrastructures*, 6(8), 1–20. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6080116>
- Kolendo, G., Voronova, V., Bumanis, G., Korjamins, A., & Bajare, D. (2024). Life Cycle Assessment of End-of-Life Tire Disposal Methods and Potential Integration of Recycled Crumb Rubber in Cement Composites. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/app142411667>
- Li, Z., Li, S., & Jiang, C. (2025). A Study on the Mechanical Properties and Performance of Fibrous Rubberized Concrete. *Buildings*, 15(8), 1–19. <https://doi.org/10.3390/buildings15081245>
- Mim, N. J., Ahmed, M., Zhang, X., Shaikh, F., Hamoda, A., Patel, V. I., & Abadel, A. A. (2025). Investigation of Fresh, Mechanical, and Durability Properties of Rubberized Fibre-Reinforced Concrete Containing Macro-Synthetic Fibres and Tyre Waste Rubber. *Buildings*, 15(15), 1–26. <https://doi.org/10.3390/buildings15152778>
- Mohamed, S., Elemam, H., Seleem, M. H., & Sallam, H. E. D. M. (2024). Effect of fiber addition on strength and toughness of rubberized concretes. *Scientific Reports*, 14(1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-54763-w>
- Pham, T. M., Lee, J., Pournasiri, E., Li, J., Peng, Z., Bi, K., & Tran, T. M. (2024). Impact of Rubber Content on Performance of Ultra-High-Performance Rubberised Concrete (UHPRuC). *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00688-7>
- Riatmojo, E., Nurchasanah, Y., Solikin, M., Ujianto, M., & Penelitian Beton Serat Karet, A. (2023). Pengaruh Material Karet dari Limbah Ban Bekas sebagai Serat pada Beton terhadap Sifat Mekanis. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS 2023*, 3–5. <https://doi.org/10.35940/ijrte.D8902.1184>

- Sherbini, A. S., & El-Mal, H. S. S. A. (2025). Assessment of rubberized concrete as a promising green building material. *Journal of Umm Al-Qura University for Engineering and Architecture*. <https://doi.org/10.1007/s43995-025-00176-3>
- Siahkouhi, M., Li, C., Astaraki, F., Rad, M. M., Fischer, S., & Jing, G. (2022). Comparative Study of the Mechanical Behavior of Concrete Railway Sleeper Mix Design, using Waste Rubber and Glass Materials. *Acta Polytechnica Hungarica*, 19(6), 213–224. <https://doi.org/10.12700/aph.19.6.2022.6.15>
- Singaravel, D. A., Veerapandian, P., Rajendran, S., & Dhairiyasamy, R. (2024). Enhancing high-performance concrete sustainability: integration of waste tire rubber for innovation. *Scientific Reports*, 14(1), 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55485-9>
- US Tire Manufacturers Association. (2023). *2023 End-of-Life Tire Management Report About the U . S . Tire Manufacturers Association*.