

ANALISIS PERILAKU BETON RAMAH LINGKUNGAN DENGAN SERBUK LIMBAH KARET BAN BEKAS DALAM PERSPEKTIF FORENSIC ENGINEERING

Listiyono Budi^{1,*}), Endah Kanti Pangestuti²), Fatimah¹)

¹)Program Studi Pendidikan Teknik Bangunan, Universitas Negeri Semarang
Kampus Unnes Sekaran, Kec. Gunungpati, Kota Semarang, Jawa Tengah 50229

²)Program Studi Teknik Sipil, Universitas Negeri Semarang
Kampus Unnes Sekaran, Kec. Gunungpati, Kota Semarang, Jawa Tengah 50229

*Correspondent Author: listiyono.budi@mail.unnes.ac.id

Abstract

Concrete with waste tire rubber powder is one of the approaches to utilizing rubber waste, which continues to increase in volume over time. This study aims to investigate in detail the effects of using waste tire rubber powder on the mechanical properties of concrete through experimental methods, with a focus on compressive strength and elastic modulus. The comparison results of compressive strength and elastic modulus are then analyzed using a forensic engineering approach to determine their impact on potential structural failures and their influence on the service life of the structure. The results of this study show that the use of rubber powder in the range of 2.5% to 10% as a fine aggregate substitute in concrete mixtures can reduce compressive strength and elastic modulus by approximately 16% to 28% for compressive strength, and 5% to 11% for elastic modulus. In terms of structural service life, the use of rubberized concrete can reduce the service life by approximately 22% to 27%. Rubberized concrete offers great potential in rubber waste utilization and in enhancing the sustainability of construction materials. However, from a forensic engineering perspective, rubberized concrete presents new challenges in understanding, evaluating, and predicting the long-term performance of structures.

Keywords: *eco-friendly concrete, rubber powder, compressive strength, forensic engineering, service life*

PENDAHULUAN

Era globalisasi pada masa sekarang telah mendorong perkembangan pesat dalam berbagai bidang seperti teknologi, ilmu pengetahuan, ekonomi, serta pembangunan infrastruktur, yang secara langsung maupun tidak langsung memberikan dampak signifikan terhadap perubahan ekosistem dan lingkungan global. Salah satu konsekuensi yang paling menonjol dari perkembangan yang

pesat ini adalah peningkatan emisi karbon dioksida (CO₂) yang kini menjadi isu krusial dalam agenda pembangunan global. Berdasarkan data dari *Global Carbon Report 2024*, pada tahun 2024 emisi karbon global mencapai rekor tertinggi dalam satu dekade terakhir dengan peningkatan emisi mencapai 0,8% dari tahun 2023 dan potensi kenaikan suhu global melebihi 1,5 derajat celsius dalam waktu sekitar enam tahun. Hal ini

terjadi karena didorong oleh peningkatan konsumsi energi fosil dan kurangnya implementasi teknologi rendah karbon secara merata di seluruh dunia (Friedlingstein dkk., 2025).

Laporan tersebut juga menyoroti bahwa sektor konstruksi, transportasi, dan industri menjadi penyumbang utama emisi, yang memperparah dampak perubahan iklim dan degradasi lingkungan. Situasi ini mendorong para pemimpin dunia dan pembuat kebijakan untuk merumuskan strategi pembangunan berkelanjutan yang holistik dan berbasis mitigasi risiko lingkungan. Penerapan kebijakan tersebut menjadi langkah strategis dalam upaya menurunkan emisi karbon, melestarikan lingkungan hidup, serta menjamin keberlangsungan hidup manusia dan keseimbangan ekosistem dalam jangka panjang. Dengan demikian, pembangunan berkelanjutan tidak hanya menjadi pilihan, melainkan kebutuhan mendesak dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang kian kompleks (Ulum & Ngindana, 2017).

Salah satu sektor yang menjadi penyumbang utama emisi karbon adalah sektor konstruksi. Saat ini perkembangan di sektor konstruksi berkembang sangat pesat, perkembangan yang pesat tersebut diiringi dengan tantangan yang semakin besar dalam mengurangi dampak lingkungan akibat penggunaan bahan bangunan konvensional, khususnya beton. Produksi beton, terutama semen sebagai bahan utamanya, merupakan salah satu

penyumbang terbesar emisi karbon global. Untuk itu, berbagai pendekatan dilakukan guna menciptakan beton ramah lingkungan yang tidak hanya menurunkan emisi karbon, tetapi juga memanfaatkan limbah-limbah yang selama ini sulit terurai, yang mana ini sejalan dengan konsep pembangunan berkelanjutan.

Selain sektor konstruksi, sektor lain yang menjadi penyumbang utama emisi karbon adalah sektor transportasi. Sektor ini merupakan salah satu sektor vital untuk mendukung mobilitas masyarakat. Salah satu hal terpenting di dalam sektor ini adalah kendaraan bermotor, yang mana setiap tahun jumlah kendaraan bermotor yang ada di masyarakat semakin meningkat, dan hal ini menyebabkan kebutuhan terhadap ban kendaraan semakin meningkat pula. Hal ini tentunya akan menyebabkan volume limbah ban karet akan semakin meningkat dikarenakan kebutuhan untuk penggantian ban secara berkala pada kendaraan bermotor (Gunawan dkk., 2022; Setiaji dkk., 2021).

Limbah ban karet termasuk jenis material yang tidak dapat diuraikan secara alami oleh mikroorganisme (*non-biodegradable*) dan memiliki sifat yang sangat tahan terhadap proses pelapukan (Najib & Nadia, 2014). Kondisi tersebut membutuhkan solusi penyelesaian agar limbah ban karet tidak memberikan dampak yang negatif bagi lingkungan. Salah satu alternatif solusi yang dapat dilakukan adalah dengan mengubah limbah ban karet menjadi serbuk karet dan memanfaatkannya sebagai bahan

pengganti sebagian agregat halus di dalam campuran beton (Idroes dkk., 2022).

Limbah serbuk karet dari ban karet telah banyak diteliti sebagai bahan pengganti sebagian agregat halus dalam beton. Kelebihanya adalah meningkatkan fleksibilitas dalam menahan beban lentur, terutama dalam aplikasinya untuk beton pada perkerasan jalan (Fadhilah & Kushari, 2018; Nastain & Maryoto, 2010). Selain itu kelebihan dari penggunaan serbuk karet dari ban bekas adalah dapat meningkatkan kemampuan redaman getaran pada beton sebesar 40% - 85% dari beton normal (Handoko dkk., 2019; Kusuma dkk., 2021) dan dapat meningkatkan daktilitas beton sebesar 12% - 16% dari beton normal (Balqis, 2023; Darmawan, 2023).

Meskipun memiliki beberapa keunggulan, penggunaan serbuk karet untuk campuran beton juga memiliki beberapa kekurangan yaitu menurunnya kuat tekan, kuat tarik belah, dan modulus elastisitas (Harry dkk., 2023; Nasution dkk., 2020; Riatmojo dkk., 2023) yang mana ketiga hal tersebut merupakan parameter utama dalam material beton yang berkaitan erat dengan performa struktur dalam menerima beban statis maupun dinamis. Kondisi tersebut perlu untuk menjadi perhatian karena performa struktur sangat berkaitan erat dengan umur layan dari struktur tersebut.

Umur layan struktur adalah periode waktu di mana suatu struktur dapat berfungsi dengan baik sesuai

dengan peruntukannya tanpa mengalami kerusakan signifikan yang dapat mempengaruhi keselamatan dan kinerjanya. Umur layan struktur ditentukan oleh berbagai faktor, salah satunya adalah kualitas material yang digunakan (Habirun & Shidiq, 2017; Sudjono, 2005).

Penggunaan beton dengan serbuk limbah ban karet berhubungan erat dengan perilaku secara jangka panjang dan umur layan jika material tersebut digunakan dalam sebuah struktur bangunan. Untuk melakukan analisis hubungan antara penggunaan beton dengan serbuk limbah ban karet terhadap umur layan dapat menggunakan pendekatan *forensic engineering*.

Forensic engineering adalah disiplin ilmu yang digunakan untuk menyelidiki kegagalan struktur, baik akibat kesalahan desain, material, atau faktor lingkungan (Petty, 2013; Ratay, 2017). Dalam konteks inovasi material, seperti penggunaan serbuk limbah karet ban bekas sebagai campuran beton, *forensic engineering* memiliki peran penting dalam mengevaluasi dampak perubahan sifat mekanis beton terhadap ketahanan struktur dalam jangka panjang sehingga akan diketahui sejauh mana pengaruh dari penggunaan serbuk limbah ban karet bekas terutama jika dikaitkan dengan umur layan struktur.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui secara detail mengenai pengaruh penggunaan serbuk limbah ban karet terhadap sifat mekanis beton secara eksperimental, dengan fokus terhadap nilai kuat tekan dan modulus

elastisitas. Hasil perbandingan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas tersebut selanjutnya dianalisis dengan pendekatan *forensic engineering* untuk mendapatkan pengaruhnya terhadap potensi kegagalan struktur yang mungkin terjadi dan pengaruhnya terhadap umur layan struktur. Perhitungan umur layan struktur pada penelitian ini menggunakan metode pendekatan matematis. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi mengenai pengaruh penggunaan serbuk limbah ban karet bekas pada campuran beton terhadap sebuah struktur dalam jangka panjang.

METODE PENELITIAN

Desain Campuran Beton

Desain campuran beton yang digunakan pada penelitian dibuat berdasarkan ketentuan di SNI 03-2834-2000. Rancangan beton normal yang dibuat memiliki mutu setara K-250 ($f'c$ 20,7 Mpa) dengan lima variasi campuran serbuk limbah ban karet bekas yaitu 0%; 2,5%; 5%; 7,5%; & 10% dengan proporsi campuran serbuk limbah ban karet bekas dihitung berdasarkan berat agregat halus. Berdasarkan perhitungan desain campuran beton, diperoleh perbandingan berat semen : pasir : kerikil = 1 : 2,1 : 3,2 dengan nilai faktor air semen (fas) sebesar 0,58. Detail rencana campuran beton untuk setiap variasi penambahan serbuk limbah karet ban bekas dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Desain Campuran Beton

| Rencana Pembuatan Beton per Variasi 3 Sample + 12,5% Residu | | | | | |
|---|------------|------------|--------------|------------|----------|
| Variasi | Pasir (kg) | Karet (kg) | Kerikil (kg) | Semen (kg) | Air (kg) |
| 0% | 12,968 | 0,000 | 19,453 | 6,475 | 3,755 |
| 2,5% | 12,644 | 0,083 | 19,453 | 6,475 | 3,755 |
| 5% | 12,320 | 0,166 | 19,453 | 6,475 | 3,755 |
| 7,5% | 11,996 | 0,250 | 19,453 | 6,475 | 3,755 |
| 10% | 11,672 | 0,333 | 19,453 | 6,475 | 3,755 |

Pengujian Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan sampel beton dilakukan secara eksperimental dengan alat *Compression Testing Machine* (CTM) terhadap benda uji yang berumur 28 hari (atau dibawah 28 hari dengan perhitungan konversi) dengan memberikan tekanan terhadap benda uji yang diletakkan secara vertikal sampai runtuh. Beban maksimum (P_{max}) yang menyebabkan keruntuhan sampel silinder beton dibagi dengan

luas sisi yang terdesak (A) maka akan diperoleh nilai kuat tekan beton tersebut. Prosedur pengujian kuat tekan beton mengacu pada SNI 1974:2011 dengan perhitungan kuat tekan beton dapat dilihat pada persamaan 1 berikut.

$$f'c = \frac{P_{max}}{A} \quad (\text{Pers. 1})$$

Dengan $f'c$ merupakan nilai kuat tekan beton benda uji silinder (N/mm^2 atau

Mpa); P_{max} merupakan beban tekan maksimum (N); dan A merupakan luas permukaan benda uji silinder (mm^2).

Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Pengujian modulus elastisitas beton adalah metode untuk menentukan tingkat kekakuan beton dalam menahan deformasi elastis saat diberikan beban. Pengujian ini dilakukan secara ekperimental dengan menekan spesimen beton berbentuk silinder menggunakan mesin uji tekan dan mengukur regangan yang terjadi. Data tegangan dan regangan yang digunakan untuk acuan perhitungan modulus elastisitas beton diambil pada posisi regangan 0,00005 dan tegangan sebesar 40% dari nilai $f'c$. Prosedur pengujian modulus elastisitas beton mengacu pada ASTM C469-02 dengan perhitungan modulus elastisitas beton dapat dilihat persamaan 2 berikut.

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1} \quad (\text{Pers. 2})$$

Dengan E_c merupakan modulus elastisitas beton (Mpa); S_2 dan S_1 merupakan nilai tegangan beton pada posisi 40% $f'c$ dan regangan 0,00005 (Mpa); serta ϵ_2 dan ϵ_1 merupakan nilai regangan beton pada posisi 40% $f'c$ dan regangan 0,00005. Sedangkan jika berdasarkan SNI 2847-2019, rumus umum untuk menghitung modulus elastisitas adalah sebagai berikut (persamaan 3):

$$E_c = k \cdot \sqrt{f'c} \quad (\text{Pers. 3})$$

Dengan k merupakan rasio modulus elastisitas (4700 jika sesuai SNI atau berdasarkan hasil pengujian eksperimental).

Terkait dengan penggunaan serbuk karet sebagai substitusi agregat halus dengan persentase tertentu, hal tersebut akan menurunkan nilai modulus elastisitas beton. Berdasarkan hasil penelitian terdahulu (Harry dkk., 2023; Nasution dkk., 2020; Riatmojo dkk., 2023), penurunan nilai modulus elastisitas tidak membentuk pola linier namun cenderung membentuk pola polinomial, sehingga untuk rumus umum modulus elastisitas sesuai SNI pada persamaan 3 perlu untuk diberikan faktor reduksi agar dapat digunakan untuk memprediksi nilai modulus elastisitas beton untuk semua nilai persentase campuran serbuk karet terhadap agregat halus. Penambahan faktor reduksi dapat dilihat pada persamaan 4 berikut.

$$E_c = k \cdot \beta \cdot \sqrt{f'c} \quad (\text{Pers. 4})$$

Dengan β merupakan faktor reduksi modulus elastisitas akibat serbuk karet.

Analisis Umur Layan Struktur

Umur layan struktur adalah periode waktu di mana suatu struktur bangunan atau infrastruktur dapat berfungsi secara optimal sesuai dengan kriteria desain sebelum mengalami degradasi yang signifikan atau memerlukan perbaikan besar. Umur layan dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kualitas material, lingkungan, beban yang bekerja, serta metode perawatan dan perbaikan yang

dilakukan. Pada penelitian ini analisis umur layan struktur menggunakan pendekatan matematis berdasarkan data nilai kuat tekan beton normal dan beton serat karet.

Kuat tekan beton cenderung mengalami peningkatan dalam beberapa bulan pertama setelah pencampuran, tetapi kemudian menurun seiring dengan berjalannya waktu akibat faktor lingkungan dan kondisi pembebanan. Perubahan kuat tekan terhadap waktu dapat dimodelkan dengan persamaan eksponensial yang berasal dari standar *fib Bulletin 65: Model Code 2010* (fib Fédération internationale du béton, 2012) sebagai berikut.

$$f'c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f'c \quad (\text{Pers. 5})$$

Dengan $f'c(t)$ merupakan nilai kuat tekan beton pada umur t hari (Mpa); dan $\beta_{cc}(t)$ merupakan fungsi yang mendeskripsikan peningkatan kuat tekan berdasarkan waktu, sampai dengan umur beton mencapai 28 hari.

Persamaan 5 di atas belum memperhitungkan faktor degradasi material beton seiring dengan berjalannya waktu, terutama dengan adanya penambahan serbuk karet yang dapat lebih mempercepat degradasi material beton (karena porositas, retak mikro, dan ikatan antar beton dengan serbuk karet yang tidak optimal) hingga 1,5 hingga 2 kali lipat dibanding beton normal (Liu dkk., 2022; Siddique & Naik, 2004). Untuk memperhitungkan faktor degradasi material beton seiring dengan berjalannya waktu, maka persamaan 5

di atas perlu untuk dimodifikasi dengan penambahan eksponensial degradasi material menjadi persamaan 6 berikut.

$$f'c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f'c \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{Pers. 6})$$

Dengan e merupakan bilangan eksponen/euler (2,71828); dan λ merupakan koefisien degradasi material (asumsi 0,005, untuk beton normal dengan lingkungan normal).

Persamaan 6 di atas terdapat notasi $\beta_{cc}(t)$ yang mana notasi tersebut menandakan peningkatan kuat tekan beton sampai dengan umur 28 hari, sedangkan dalam penelitian ini akan mengamati perilaku kuat tekan beton sampai umur layan secara jangka panjang. Nilai kuat tekan beton dianggap sudah mencapai 100% setelah beton mencapai umur 28 hari dan setelah itu dianggap tidak mengalami peningkatan kuat tekan yang signifikan. Berdasarkan kondisi tersebut, maka nilai $\beta_{cc}(t)$ untuk pengamatan jangka panjang dapat dianggap sama dengan 1 sehingga persamaan 6 di atas dapat disederhanakan menjadi persamaan 7 sebagai berikut.

$$f'c(t) = f'c \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{Pers. 7})$$

Persamaan 7 tersebut merupakan persamaan eksponensial yang dapat digunakan untuk memperkirakan penurunan kuat tekan beton secara jangka panjang seiring waktu. Persamaan ini sama dengan persamaan eksponensial yang digunakan oleh

Tang dkk di dalam (Cao dkk., 2024) dan (Alotaibi & Nassar, 2022).

Nilai λ yang ditentukan sebesar 0,005 pada persamaan 7 di atas hanya berlaku untuk beton normal dan pada lingkungan normal, untuk beton dengan serbuk karet nilai λ tersebut harus dimodifikasi untuk mempertimbangkan degradasi material (kuat tekan dan modulus elastisitas) beton yang lebih cepat dengan adanya campuran serbuk karet (Liu dkk., 2022; Siddique & Naik, 2004). Kondisi tersebut menggambarkan bahwa

kualitas beton akan semakin menurun seiring dengan penambahan serbuk karet, dan secara jangka panjang penurunan kualitas tersebut akan lebih besar dibandingkan dengan beton normal. Sehingga nilai λ untuk beton karet akan lebih besar dibandingkan dengan beton normal. Penyesuaian nilai λ dengan memperhitungkan penurunan kuat tekan ($f'c$) dan modulus elastisitas (E_c) untuk beton dengan serbuk karet dapat dilihat pada persamaan 8 berikut.

$$\lambda_{\text{karet}} = \lambda_{\text{normal}} \cdot \underbrace{\left(\frac{\beta_{\text{karet}} \cdot \sqrt{f'c_{\text{karet}}}}{\beta_{\text{normal}} \cdot \sqrt{f'c_{\text{normal}}}} \right)}_{\text{Faktor reduksi } E_c} \cdot \underbrace{\left(\frac{f'c_{\text{normal}}}{f'c_{\text{karet}}} \right)}_{\text{Faktor reduksi } f'c} \quad (\text{Pers. 8})$$

Dengan λ_{karet} dan λ_{normal} merupakan koefisien degradasi material untuk beton dengan serbuk karet dan beton normal (diasumsikan 0,005); β_{karet} dan β_{normal} merupakan koefisien reduksi modulus elastisitas untuk beton serbuk karet dan beton normal dari persamaan 4; serta $f'c_{\text{karet}}$ dan $f'c_{\text{normal}}$ merupakan nilai kuat tekan beton serbuk karet dan beton normal umur 28 hari (Mpa).

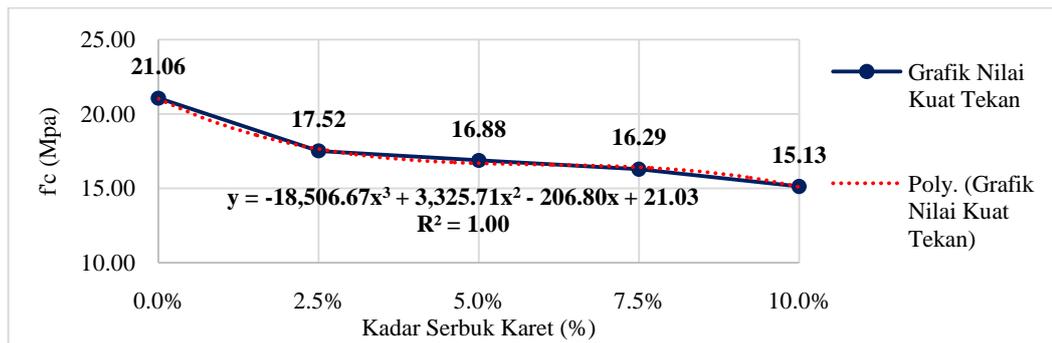
sebesar 0,8 dari $f'c$ awal. Penentuan umur layan struktur (t_{layan}) dari modifikasi persamaan 8 di atas dapat dilihat pada persamaan 9 berikut.

$$t_{\text{layan}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left(\frac{f'c}{f'c_{\text{min}}} \right) \quad (\text{Pers. 9})$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Campuran Serbuk Karet terhadap Kuat Tekan Beton

Pengujian kuat tekan dilakukan pada saat beton berumur 28 hari setelah pembuatan dan perawatan untuk mendapatkan beban maksimum (P_{maks}) dalam menerima beban atau tekanan. Hasil pengujian kuat tekan rata-rata pada sampel silinder beton dapat dilihat pada grafik di Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Grafik Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Berdasarkan Gambar 1 di atas, terlihat bahwa dengan penambahan serbuk karet pada campuran beton dapat menurunkan nilai kuat tekan dengan kadar serbuk karet 0%; 2,5%; 5%; 7,5% dan 10% berturut-turut mempunyai nilai kuat tekan rata-rata

sebesar 21,06 Mpa; 17,52 Mpa; 16,88 Mpa; 16,29 Mpa; dan 15,13 Mpa. Hasil pengujian kuat tekan antara beton normal dan beton serbuk karet membentuk persamaan regresi pangkat tiga sebagai berikut:

$$y = -18.506,67x^3 + 3.325,71x^2 - 206,80x + 21,03 \quad (\text{Pers. 10})$$

Persamaan 10 tersebut mempunyai koefisien determinasi (R^2) sebesar 1,00 yang artinya persamaan tersebut dapat menjelaskan pola nilai kuat tekan beton antara beton normal dan beton serbuk karet dalam penelitian ini dengan akurat.

Penggunaan serbuk karet sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton secara langsung menurunkan nilai kuat tekan beton. Dalam perspektif *forensic engineering*, hal ini untuk menandakan beberapa hal yang perlu untuk menjadi perhatian dalam penggunaan beton serbuk karet secara jangka panjang. Penurunan kuat tekan terjadi diakibatkan partikel serbuk karet yang tidak reaktif terhadap semen sehingga tidak memberikan kontribusi dalam proses hidrasi, sedangkan penggunaan serbuk karet sendiri menjadi substitusi dari

agregat halus. Kuat tekan rendah akibat penggunaan serbuk karet dapat berkontribusi langsung terhadap keruntuhan, terutama pada elemen struktural yang dominan menerima gaya tekan. Selain itu juga serbuk karet memiliki sifat hidrofobik yang dapat menyebabkan ikatan antar muka serbuk karet dengan pasta semen lemah. Terdapat beberapa solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi kondisi tersebut, salah satunya adalah dengan merendam serbuk karet dalam larutan NaOH yang dapat menghilangkan sifat hidrofobik dari serbuk karet (Nuzaimah dkk., 2020; Shahzad & Zhao, 2022). Selain itu juga dapat memberikan tambahan material fly ash untuk dapat mengisi pori di antara partikel serbuk karet dan pasta semen sehingga dapat meningkatkan densitas mikrostruktur

(Murali dkk., 2021; Raj & Somasundaram, 2023).

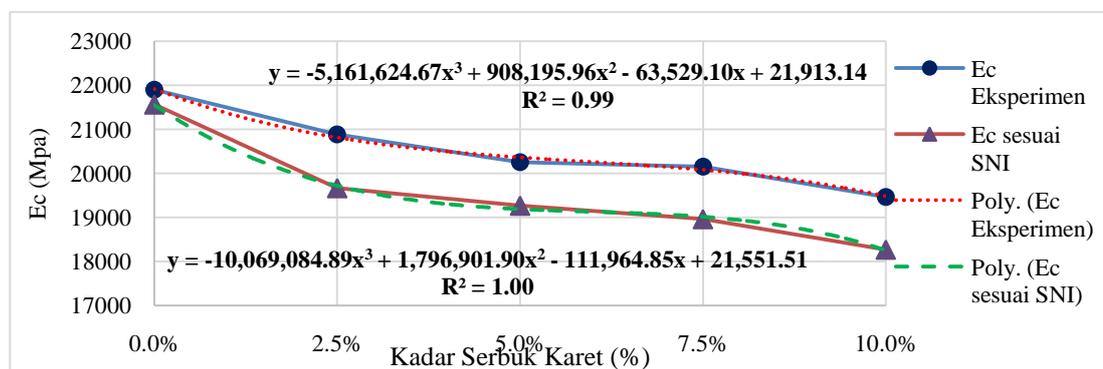
Pengaruh Campuran Serbuk Karet terhadap Modulus Elastisitas Beton

Pengujian modulus elastisitas beton menggunakan alat *Compression Testing Machine* (CTM) yang dilengkapi dengan *strain compressor meter* dan *dial gauge* saat pengujian

kuat tekan dilakukan. Alat tersebut berfungsi untuk mengetahui nilai tegangan dan regangan yang terjadi pada setiap pemberian beban secara kontinyu per 20 kN sampai sampel silinder beton hancur akibat beban maksimum. Hasil pengujian modulus elastisitas dapat dilihat pada Tabel 2 dan grafik pada Gambar 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Pengujian Modulus Elastisitas

| Camp. | Ec Eksperimen (Mpa) | Ec sesuai SNI (Mpa) | Rasio |
|-------|---------------------|---------------------|-------------|
| (a) | (b) = Pers. 2 | (c) = Pers. 3 | (d) = (b/c) |
| 0% | 21895,28 | 21564,69 | 1,015 |
| 2,50% | 20883,31 | 19665,37 | 1,062 |
| 5% | 20254,83 | 19266,00 | 1,051 |
| 7,50% | 20150,93 | 18961,08 | 1,063 |
| 10% | 19462,71 | 18268,14 | 1,065 |



Gambar 2. Grafik Hasil Pengujian Modulus Elastisitas Beton

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 2 dapat dilihat bahwa nilai modulus elastisitas beton semakin menurun seiring dengan pertambahan persentase serbuk karet di dalam campuran beton. Beton dengan campuran serbuk karet sebesar 2,5% hingga 10% memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah dari beton normal dengan penurunan berkisar antara 5% hingga 11%. Berdasarkan perbandingan dengan rumus standar perhitungan modulus

elastisitas (E_c) sesuai SNI, nilai modulus elastisitas untuk beton serbuk karet tidak dapat dihitung dengan rumus standar sesuai SNI karena semakin banyak persentase serbuk karet yang digunakan akan memberikan selisih nilai modulus elastisitas yang semakin besar. Terkait kondisi tersebut, maka perlu untuk membuat sebuah persamaan baru untuk menghitung modulus elastisitas beton serbuk karet dengan

memperhitungkan persentase serbuk karet yang digunakan pada campuran beton. Persamaan yang diajukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada persamaan 4 dengan nilai β yang diajukan menggunakan persamaan 11 berikut.

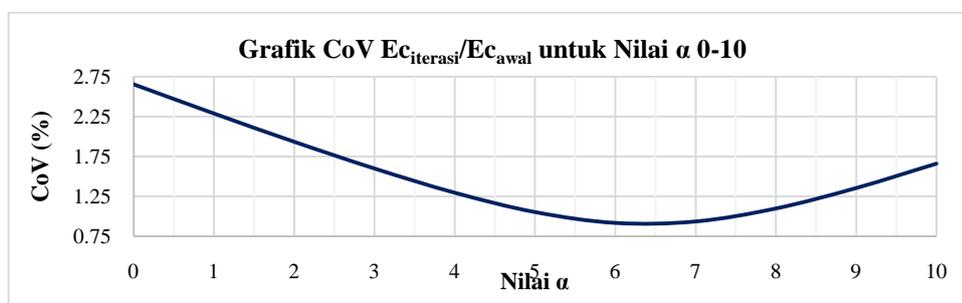
$$\beta = \left(\frac{1}{1-n} \right)^{1-(\alpha n)} \quad (\text{Pers. 11})$$

$$E_c = k \times \left(\left(\frac{1}{1-n} \right)^{1-(\alpha n)} \right) \times \sqrt{f_c} \quad (\text{Pers. 12})$$

Penentuan nilai α yang digunakan berdasarkan nilai CoV terendah. Nilai CoV merupakan nilai perbandingan antara standar deviasi dan rata-rata data, semakin kecil nilai CoV menandakan sebaran data semakin seragam dan semakin stabil nilai rata-

Dengan n merupakan persentase serbuk karet (%) dan α merupakan koefisien gradasi E_c (dicoba 1-10 untuk mencari nilai perbandingan CoV (*Coefficient of Variation*) dengan E_c eksperimen yang paling rendah). Persamaan 11 tersebut disubstitusikan ke persamaan 4 sehingga persamaan 4 dapat ditulis ulang sebagai berikut:

ratanya. Penentuan nilai α dilakukan dengan menggunakan metode iterasi untuk mencari nilai α yang menghasilkan nilai CoV minimum. Proses iterasi dapat dilihat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Grafik Iterasi CoV $E_{c_{iterasi}}/E_{c_{awal}}$ untuk Nilai $\alpha = 0 - 10$

Berdasarkan Gambar 3 diperoleh nilai α yang menghasilkan CoV minimal adalah $\alpha = 6,4$ sehingga persamaan 12 dapat ditulis ulang menjadi persamaan 13 di bawah. Persamaan 13 tersebut

$$E_c = k \times \left(\left(\frac{1}{1-n} \right)^{1-(6,4 n)} \right) \times \sqrt{f_c} \quad (\text{Pers. 13})$$

selanjutnya dicoba untuk menghitung nilai E_c beton serbuk karet kemudian dibandingkan dengan nilai E_c eksperimen. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 3 di bawah.

Tabel 3. Perhitungan Modulus Elastisitas

| Camp. | Ec Eksperimen (Mpa) | Ec Teori (Mpa) | Rasio |
|--|---------------------|----------------|-------------|
| (a) | (b) = Pers. 2 | (c) = Pers. 13 | (d) = (b/c) |
| 0% | 21895,28 | 21895,28 | 1,0000 |
| 2,50% | 20883,31 | 20399,74 | 1,0237 |
| 5% | 20254,83 | 20298,11 | 0,9979 |
| 7,50% | 20150,93 | 20053,41 | 1,0049 |
| 10% | 19462,71 | 19275,85 | 1,0097 |
| Rata-rata | | | 1,0072 |
| Standar Deviasi | | | 0,0092 |
| <i>Coefficient of Variation (CoV), %</i> | | | 0,9132 |

Hasil dari perhitungan nilai modulus elastisitas beton menggunakan persamaan 13 di atas memberikan hasil yang cukup akurat dengan nilai CoV (*Coefficient of Variation*) sebesar 0,9132%. Sehingga secara umum persamaan 13 dapat digunakan untuk menghitung modulus elastisitas (Ec) beton dengan persentase serbuk karet tertentu.

Modulus elastisitas beton dengan serbuk karet sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton nilai menurun sejalan dengan penurunan nilai kuat tekannya. Hal ini dikarenakan modulus elastisitas secara langsung dipengaruhi oleh kuat tekan. Selain itu, sifat material karet yang lebih lentur dan permukaan karet yang hidrofobik dapat menyebabkan kekakuan dari beton yang dihasilkan. Meskipun nilai modulus elastisitas beton menurun, di sisi lain kemampuan beton serbuk karet dalam menahan redaman getaran semakin meningkat (Handoko dkk., 2019; Kusuma dkk., 2021).

Dalam perspektif *forensic engineering*, hal ini perlu untuk diperhatikan secara khusus

dikarenakan beton dengan serbuk karet memiliki sifat lebih lentur namun kurang kaku jika dibandingkan dengan beton normal. Secara jangka panjang, sebuah struktur yang menggunakan beton serbuk karet mungkin menunjukkan defleksi atau lendutan yang lebih besar namun tidak mengalami retak struktural atau dengan kata lain, struktur tersebut bisa bertahan terhadap deformasi besar. Kondisi tersebut dapat menyebabkan interpretasi yang salah di masa yang akan datang jika *engineer* tidak memahami tentang perilaku dari beton dengan serbuk karet. Sehingga dalam evaluasi forensik harus memperhitungkan perilaku beton serbuk karet yang dapat berdeformasi besar sebagai bagian dari karakteristik normal struktur, bukan sebagai indikator kegagalan.

Beton dengan serbuk karet memungkinkan desain yang lebih adaptif terhadap beban dinamis atau gempa karena kemampuannya menyerap energi melalui deformasi yang lebih besar dari beton normal, namun demikian perlu untuk melakukan perubahan pendekatan

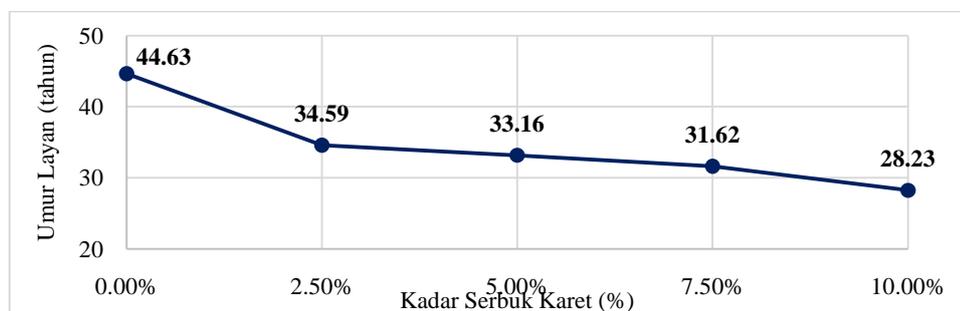
dalam konteks desain, monitoring, dan evaluasi forensik struktur untuk mengakomodir kelebihan dari beton serbuk karet tersebut. Di satu sisi, kondisi ini membuka peluang baru untuk membuat desain struktur yang lebih tahan terhadap deformasi besar dan ramah lingkungan, tapi di sisi lain menuntut pendefinisian ulang terhadap indikator kerusakan struktural.

Pengaruh Campuran Serbuk Karet terhadap Umur Layan Struktur

Perhitungan umur layan struktur untuk beton normal dan beton serbuk karet dihitung berdasarkan penurunan nilai kuat tekan beton sampai batas $0,8 f_c'$. Hasil perhitungan umur layan struktur untuk beton normal dan beton serbuk karet dapat dilihat pada Tabel 4 dan grafik pada Gambar 4 berikut.

Tabel 4. Perhitungan Umur Layan Struktur

| Camp. | f'_c (Mpa) | $f'_{c,karet} / f'_{c,normal}$ | λ | $f'_{c,min}$ (Mpa) | t_{layan} (tahun) |
|--------|--------------|--------------------------------|---------------|--------------------|---------------------|
| (a) | (b) | (c) | (d) = Pers. 8 | (e) = $(0,8*b)$ | (f) = Pers. 9 |
| 0,00% | 21,06 | - | 0,0050 | 16,85 | 44,63 |
| 2,50% | 17,65 | 1,2021 | 0,0065 | 14,12 | 34,59 |
| 5,00% | 16,69 | 1,2476 | 0,0067 | 13,35 | 33,16 |
| 7,50% | 16,42 | 1,2928 | 0,0071 | 13,14 | 31,62 |
| 10,00% | 15,10 | 1,3919 | 0,0079 | 12,08 | 28,23 |



Gambar 4. Grafik Hubungan Kadar Serbuk Karet dengan Umur Layan Struktur

Berdasarkan Tabel 4 dan Gambar 4 di atas, terlihat bahwa penambahan serbuk karet sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton menurunkan umur layan struktur secara signifikan dari 44,63 tahun untuk beton normal menjadi 34,59 tahun (turun 22%) hingga 28,23 tahun (turun 27%) untuk kadar serbuk karet 2,5% hingga 10%. Dalam perspektif *forensic engineering*, kondisi

menunjukkan bahwa beton serbuk karet berpotensi untuk mengalami kegagalan struktural yang lebih cepat. Hal ini dikarenakan beton dengan serbuk karet cenderung memiliki modulus elastisitas rendah dan kuat tekan yang menurun dibanding beton normal yang mana kondisi dapat mempercepat deformasi jangka panjang (*creep* dan *shrinkage*) jika

tidak diperhitungkan secara mendetail pada tahap desain.

Struktur yang menggunakan beton serbuk karet berisiko menunjukkan kerusakan dini, yang dalam evaluasi forensik bisa keliru diinterpretasikan sebagai keruntuhan akibat beban berlebih atau cacat struktural. Beton dengan serbuk karet menawarkan peluang besar dalam penggunaan limbah karet dan meningkatkan keberlanjutan material konstruksi. Namun, dari perspektif *forensic engineering*, beton dengan serbuk karet menimbulkan tantangan baru dalam memahami, mengevaluasi, dan memprediksi performa jangka panjang struktur.

SIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini adalah penggunaan serbuk karet dengan kadar 2,5% hingga 10% sebagai substitusi agregat halus dalam campuran beton dapat menurunkan nilai kuat tekan dan modulus elastisitas beton dalam rentang 16% hingga 28% untuk kuat tekan dan 5% hingga 11% untuk modulus elastisitas. Sedangkan terkait aspek umur layan struktur, penggunaan beton dengan serbuk karet dapat menurunkan umur layan struktur dalam rentang 22% hingga 27%. Beton dengan serbuk karet menawarkan peluang besar dalam penggunaan limbah karet dan meningkatkan keberlanjutan material konstruksi. Namun, dari perspektif *forensic engineering*, beton dengan serbuk karet menimbulkan tantangan baru dalam memahami, mengevaluasi, dan

memprediksi performa jangka panjang struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Alotaibi, R., & Nassar, M., 2022, A New Exponential Distribution to Model Concrete Compressive Strength Data. *Crystals*, 12(3).
- Balqis, N., 2023, *Uji Eksperimen Kuat Tekan, Analisis Modulus Elastisitas, dan Daktilitas Beton dengan Campuran Serbuk Karet 0%, 5%, 15%* [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta].
- Cao, H., Xiao, B., Qin, F., & Yang, Q., 2024, A Mathematical Model for Predicting the Ultra-Early-Age Strength of Concrete. *Coatings*, 14(9), 1140.
- Darmawan, A.D., 2023, *Uji Eksperimen Kuat Tekan dan Analisis Sifat Mekanik Beton dengan Campuran Limbah Serbuk Karet Ban Bekas 0%, 10%, 20%* [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta].
- Fadhilah, M. R., & Kushari, B., 2018, *Pengaruh Penggunaan Serbuk Ban Karet sebagai Pengganti Agregat Halus pada Campuran Laston (AC-WC) terhadap Kinerja Perkerasan Jalan Raya* [Skripsi, Universitas Islam Indonesia].
- fib Fédération internationale du béton, 2012, *fib Model Code 2010: Final draft – Volume 1. fib Bulletin No. 65*. fib Fédération internationale du béton.
- Friedlingstein, P., O’Sullivan, M., Jones, M.W., Andrew, R.M.,

- Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Li, H., Luijkx, I.T., Olsen, A., Peters, G.P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Alin, S.R., Zeng, J., 2025, Global Carbon Budget 2024. *Earth System Science Data*, 17(3), 965–1039.
- Gunawan, B.S., Abdillah, N., & Halimatusadiyah, 2022, Pengaruh Aspal Campuran Limbah Ban Karet terhadap Karakteristik Marshall. *JURNAL SLUMP TeS*, 1(1), 10–20.
- Habirun, A.N., & Shidiq, M.I., 2017, Peninjauan Masa Layan dan Perbaikan Struktur Dermaga terhadap Pengaruh Lingkungan Pesisir Pantai. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 8, 412–416.
- Handoko, D.D., Faizah, R., & Nugroho, G., 2019, *Perilaku Daya Redaman Beton Menggunakan Serutan Karet Ban Bekas Sebagai Campuran Agregat Halus Pada Beton* [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta].
- Harry, A., Bunyamin, B., Idroes, I., Hady, M., Pramanda, H., & Munirwan, R.P., 2023, Tinjauan Kuat Tekan Beton Berupa Serat Ban Bekas dan Pozolan Di Dalam Agregat Halus. *Jurnal Teknik Sipil dan Teknologi Konstruksi*, 9(2), 103–114.
- Idroes, I., Harli, F., & Bunyamin, 2022, Pengaruh Penggunaan Substitusi Pozolan dan Penambahan Serat Karet Ban Bekas Kendaraan terhadap Kuat Tarik Belah Beton Normal. *Journal of Planning and Research in Civil Engineering*, 1(2), 77–84.
- Kusuma, M.F.M., Faizah, R., & Nugroho, G., 2021, Pengaruh Penggantian Agregat Halus dengan Serbuk Ban Bekas pada Campuran Beton terhadap Daya Redam Getaran. *Bulletin of Civil Engineering*, 1(1), 29–32.
- Liu, L., Guan, Q., Zhang, L., Liu, C., Chen, X., & Cai, X., 2022, Evaluation of the Compressive-Strength Reducing Behavior of Concrete Containing Rubber Aggregate. *Cleaner Materials*, 4(100057).
- Murali, M., Mohammed, B.S., Abdulkadir, I., Liew, M.S., & Alaloul, W.S., 2021, Utilization of crumb rubber and high-volume fly ash in concrete for environmental sustainability: Rsm-based modeling and optimization. *Materials*, 14(12).
- Najib, Moh. A., & Nadia, 2014, Beton Normal dengan Menggunakan Ban Bekas sebagai Pengganti Agregat Kasar. *Jurnal Konstruksia*, 6(1).
- Nastain, & Maryoto, A., 2010, Pemanfaatan Pemotongan Ban Bekas untuk Campuran Beton Serat Perkerasan Kaku. *Dinamika Rekayasa*, 6(1), 14–18.
- Nasution, M., Aminnullah, A., & Suhendro, B., 2020, Pengaruh Perbedaan Ukuran Karet Ban

- Bekas terhadap Sifat Mekanik. *INERSIA Informasi dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil dan Arsitektur*, 16(1), 38–48.
- Nuzaimah, M., Sapuan, S.M., Nadlene, R., & Jawaid, M., 2020, Sodium hydroxide treatment of waste rubber crumb and its effects on properties of unsaturated polyester composites. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(11).
- Petty, S.E., 2013, *Forensic Engineering: Damage Assessments for Residential and Commercial Structures*. CRC Press.
- Raj, I.S., & Somasundaram, K., 2023, An optimized mix for the manufacture of sustainable aerated concrete blocks using waste rubber powder. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 25(4), 1273–1289.
- Ratay, R. T. (2017). An Overview of Forensic Structural Engineering. *Structural Engineering International*, 27(3), 338–343.
- Riatmojo, E., Nurchasanah, Y., Solikin, M., & Ujianto, M., 2023, Pengaruh Material Karet dari Limbah Ban Bekas sebagai Serat pada Beton terhadap Sifat Mekanis. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil UMS*, 143–145.
- Setiaji, D.H., Riyanto, S., & Novianto, D., 2021, Pengaruh Limbah Ban Karet sebagai Substitusi Pasir terhadap Kuat Tekan dan Modulus Elastisitas Beton. *Jurnal Online Skripsi Manajemen Rekayasa Konstruksi (JOS-MRK)*, 2(2), 175–181.
- Shahzad, K., & Zhao, Z., 2022, Experimental study of NaOH pretreated crumb rubber as substitute of fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 358.
- Siddique, R., & Naik, T.R., 2004, Properties of Concrete Containing Scrap-tire Rubber - An Overview. *Waste Management*, 24(6), 563–569.
- Sudjono, A.S., 2005, Studi Analisis Waktu Layan Bangunan Beton: Pengaruh Penggunaan Mineral Tambahan pada Campuran Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, 12(3), 145–158.
- Ulum, M.C., & Ngindana, R., 2017, *Environmental Governance - Isu Kebijakan dan Tata Kelola Lingkungan Hidup*. UB Press.