

Kuat Lentur Panel Dinding Non-Struktural Berbasis Limbah Karet Ban Bekas

Multilawati Nasution*, Ahmad Syapawi, Sheragizca Yolanda Situmeang,
Safitri Suci Pratiwi, Rizky Maulana, Ajeng Khoirunnisa
Teknik Sipil Politeknik Negeri Sriwijaya, Kota Palembang-30139, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

ban bekas; kuat lentur; GRC; pola retak.

*Correspondence email:

multilawati.nasution@polsri.ac.id

Submitted: 31 Juli 2026

Revised: 07 Agustus 2026

Accepted: 08 Agustus 2026

Published: 09 Agustus 2026

ABSTRAK

Limbah karet ban bekas telah menjadi salah satu permasalahan yang selalu mengalami peningkatan. Seiring dengan meningkatnya volume limbah ban bekas, diperlukan inovasi material konstruksi berkelanjutan yang mampu mengoptimalkan pemanfaatan limbah daur ulang sekaligus menjaga kinerja mekanik material. Namun demikian, dengan penambahan karet ban bekas dalam material menyebabkan penurunan kuat lentur, sehingga membatasi pemanfaatannya sebagai material panel dinding. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai sifat mekanis berupa kuat lentur pada dinding panel berbahan karet ban bekas dan melihat peningkatan kinerja dengan penambahan *Glass Fiber Reinforced Concrete* (GRC). Benda uji terdiri dari campuran ban bekas ditambah GRC dan tanpa GRC. Panel dinding tetap melakukan proses perawatan (*curing*) pada kondisi laboratorium sebelum dilakukan pengujian kuat lentur. Selain itu, pola keruntuhan dan perambatan retak diamati untuk mengidentifikasi mekanisme keruntuhan yang terjadi pada masing-masing variasi benda uji. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan GRC mampu meningkatkan tegangan lentur pada saat beban maksimum atau kuat lentur dengan rata-rata dari 1,61 MPa menjadi 2,57 MPa. Seluruh panel yang diperkuat GRC memperlihatkan pola retak yang relatif seragam, ditandai dengan retak vertikal dominan yang berkembang di sekitar daerah tengah bentang. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa mekanisme keruntuhan didominasi oleh tegangan lentur. Keberadaan GRC juga mampu memperlambat perambatan retak melalui mekanisme *crack bridging*, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap fraktur dan kapasitas panel dalam menahan beban.

ABSTRACT

Keywords:

used tires; flexural strength; GRC; crack pattern.

Waste from used tires is an ever-increasing problem. As the volume of this waste grows, there is a need for sustainable construction material innovations that optimize the use of recycled waste while maintaining mechanical performance. However, incorporating used tire rubber into materials typically reduces flexural strength, thereby limiting its application in wall panels. This study aims to determine the flexural strength of wall panels made from used tire rubber and to assess performance improvements achieved by adding *Glass Fiber Reinforced Concrete* (GRC). Test specimens consisted of mixtures containing used tire rubber, both with and without GRC. The wall panels underwent a laboratory curing process prior to flexural strength testing. Additionally, failure patterns and crack propagation were observed to identify the failure mechanisms associated with each specimen variation. The results indicate that the addition of GRC increased the average flexural stress at maximum load (flexural strength) from 1.61 MPa to 2.57 MPa. All GRC-reinforced panels exhibited relatively uniform crack patterns, characterized by dominant vertical cracks developing near the mid-span. This indicates that the failure mechanism was dominated by flexural stress. The presence of GRC also retarded crack propagation through a crack-bridging mechanism, thereby enhancing fracture resistance and the panel's load-bearing capacity.

PENDAHULUAN

Limbah ban bekas merupakan limbah padat yang sulit terurai dan dapat menimbulkan permasalahan lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Salah satu alternatif pemanfaatannya adalah menggunakan partikel karet ban sebagai pengganti sebagian agregat dalam mortar atau beton. Penggunaan karet dapat menurunkan berat jenis, meningkatkan deformabilitas, serta mendukung pengurangan konsumsi agregat alam. Namun, peningkatan kadar karet umumnya menurunkan kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, dan modulus elastisitas karena kekakuan karet lebih rendah

daripada agregat mineral serta ikatan antara permukaan karet dan pasta semen relatif lemah (Ahmad et al., 2022; Bu et al., 2022; He et al., 2023; Kilani et al., 2025; Muhammad et al., 2023).

Penelitian terdahulu yang berkaitan dengan penelitian ini adalah pengujian sifat mekanik mortar yang memiliki persentase komposisi serat karet ban bekas (Nasution et al., 2020), pada penelitian ini serat karet ban bekas dijadikan sebagai pengganti sebagian dari agregat halus yaitu pasir, adapun tujuan dari pengganti sebagian pasir adalah untuk mengetahui pengaruh karet pada ban bekas terhadap sifat mekanis dan redaman pada mortar. Penelitian ini menganalisis sifat mekanik mortar dengan komposisi serat karet ban bekas dengan menggunakan kuat tekan dan modulus elastisitas (15 cm x 30 cm), kuat lentur (10 cm x 10 cm x 50 cm), dan kuat tarik (25 mm x 50 mm x 75 mm). Penelitian ini mengevaluasi karakteristik redaman mortar yang menggunakan serat karet ban bekas sebagai pengganti sebagian volume pasir dengan campuran menggunakan formula volume absolut. Variasi atau persentase kadar karet ban bekas yang digunakan sebesar 0%, 40%, dan 60%. Hasil penelitian dengan menambahkan kadar karet ban bekas menyebabkan penurunan sifat mekanik mortar namun nilai redaman yang didapatkan justru meningkat, adapun yang ditunjukkan oleh berkurangnya nilai kuat tekan, kuat tarik, kuat lentur, dan modulus elastisitas. Berdasarkan ketentuan SNI 15-2094-2000, kuat tekan minimum sebesar 5 MPa masih dapat dicapai pada campuran dengan kandungan karet ban bekas 40% yang lolos saringan No. 4 (4,8 mm), dengan nilai redaman sebesar 3,17%.

Penelitian mengenai panel dinding beton busa dengan menambahkan perkuatan *Glass Fiber Reinforced Concrete (GRC)* dan *wiremesh* dilakukan untuk mendapatkan perbandingan sifat mekanik terutama kuat lentur di antara ketiga jenis benda uji panel dinding tersebut. Benda uji yang digunakan memiliki dimensi 800 mm x 400 mm x 50 mm dan diuji untuk mengetahui karakteristik mekaniknya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penambahan perkuatan GRC dengan perkuatan wiremesh mampu meningkatkan kinerja mekanik panel, tinjauan yang dilakukan pada penelitian tersebut adalah kuat lentur dan kuat geser. Selain itu, panel yang diperkuat dengan lapisan GRC dan wiremesh menghasilkan nilai tegangan lentur tertinggi, yaitu 5,3 MPa sehingga nilai yang didapatkan jauh lebih tinggi dibanding dengan variasi lainnya. (Tiyani et al., 2019).

Kinerja lentur material berbasis karet dipengaruhi oleh kadar, ukuran partikel, dan kualitas ikatan antara karet dan matriks semen. Peningkatan kadar karet serta terbentuknya rongga pada zona transisi antarmuka dapat menurunkan kapasitas lentur, sehingga diperlukan sistem perkuatan untuk mengendalikan retak dan membantu menahan tegangan tarik (Albidah & Alsaif, 2024; Liu et al., 2024). *Glass Fiber Reinforced Concrete (GRC)* yaitu suatu material dengan bahan utama semen yang diperkuat serat kaca. Serat tersebut dapat meningkatkan ketangguhan, membantu memindahkan tegangan setelah matriks mulai retak, dan memperlambat perkembangan retak melalui mekanisme *crack bridging* (Devi et al., 2022). Oleh karena itu, penggunaan GRC berpotensi mengurangi kelemahan lentur panel yang mengandung limbah karet ban.

Berdasarkan beberapa hasil penelitian terdahulu, penelitian ini mengembangkan panel dinding berbahan limbah karet ban bekas yang diperkuat dengan *Glass Fiber Reinforced Concrete (GRC)*. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis terhadap kuat lentur dan pola retak dalam upaya melakukan penambahan GRC pada panel dinding yang berbasis limbah karet ban bekas. Selain mengevaluasi kinerja mekaniknya, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadikan suatu alternatif material infrastruktur berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah ban bekas sebagai bahan daur ulang. Upaya ini dilakukan untuk menekan penggunaan agregat alami yaitu pasir sebagai sumber daya yang tidak terbarukan.

METODE

Bahan campuran panel dinding berbasis limbah karet ban bekas

Bahan campuran panel dinding meliputi semen, agregat halus, karet ban bekas serta air. Agregat halus merupakan suatu bahan pengisi pada mortar karet ban bekas sedangkan ban bekas itu sendiri merupakan pengganti dari sebagian pasir. Limbah karet ban yang digunakan adalah persentase 40% sebagai pengganti sebagian agregat halus. Campuran kadar karet yang banyak pada mortar mengakibatkan penurunan kekuatan yang disebabkan oleh kekakuan dari partikel serta lemahnya ikatan dengan matriks semen. Oleh karena itu, salah satu variasi panel diberi tambahan GRC sebagai lapisan perkuatan untuk membantu menahan tegangan tarik dan mengendalikan perkembangan retak. Penggunaan material berserat pada beton berkaret telah dilaporkan dapat mengurangi kehilangan kuat tarik dan kuat lentur serta memperbaiki perilaku pascaretak material (El Naggat & Abu Abdo, 2023; Albidah & Alsaif, 2024). Untuk semen portland merupakan bahan pengikat diantara semua bahan. Pada beberapa sampel uji kuat lentur digunakan GRC sebagai material perkuatan. Di pilih GRC dikarenakan memiliki kuat tarik yang tinggi, ketahanan terhadap perambatan retak, serta mempunyai durabilitas dengan nilai yang besar. Dengan penambahan GRC diharapkan dapat meningkatkan kinerja dari kuat lentur panel dinding.

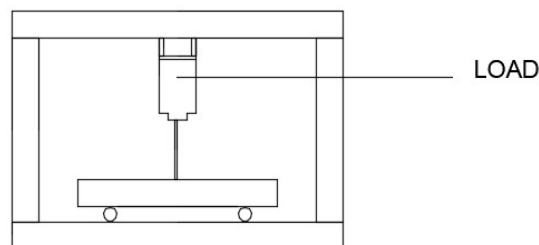
Pembuatan Benda Uji

Penelitian menggunakan dua jenis panel yang berbeda sebagai dasar untuk melakukan pengujian. Campuran pertama hanya beton yang dicampurkan dengan karet ban bekas sebagai pengganti pasir, sedangkan panel lainnya

menggunakan GRC dan karet ban bekas. Seluruh bahan dicampur menggunakan proses metode yang biasa dilakukan ketika melakukan campuran pada beton normal menggunakan mixer. Setelah dilakukan adukan pada mortar kemudian dituangkan ke dalam cetakan dari triplek yang dibuat secara manual. Setelah itu mortar dilakukan getaran untuk menghilangkan gelembung udara yang terdapat pada campuran agar nantinya mortar tersebut tidak terdapat rongga udara. Benda uji didiamkan selama 24 jam sebelum di lepaskan dari cetakan. Selanjutnya, seluruh sampel akan dirawat selama 28 hari menggunakan goni dan kemudian disiram setiap harinya.

Pengujian Kuat Lentur Panel Dinding Berbasis Limbah Karet Ban Bekas

Pengujian kuat lentur panel pada penelitian ini mengacu pada ASTM E72-05 menggunakan pembebanan dua titik. Setiap variasi terdiri atas tiga benda uji yang diuji menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) pada umur 28 hari. Panel ditempatkan pada dua tumpuan sederhana, kemudian beban diberikan secara bertahap hingga terjadi keruntuhan. Beban maksimum digunakan untuk menghitung momen dan tegangan lentur, sedangkan perkembangan retak diamati selama pengujian. Pengujian lentur dengan sistem pembebanan terkontrol dapat digunakan untuk mengevaluasi beban maksimum, deformasi, pola retak, dan mekanisme keruntuhan panel atau elemen beton berkarat (Awan & Shaikh, 2021; Albidah & Alsaif, 2024). Dimensi panel yang digunakan adalah panjang 80 cm sedangkan lebar 40 cm dengan ketebalan 5 cm. Pengujian dilakukan dengan meletakkan tumpuan diujung panel, sedangkan beban diberikan pada dua titik yang masing-masing terletak pada posisi sepertiga bentang panel.



Gambar 1. Pengujian Kuat Lentur

Pengujian kuat lentur dapat dilihat pada Gambar 1. Pengujian ini dilakukan untuk melakukan evaluasi terhadap kemampuan panel dinding dalam menahan beban lentur serta menentukan pengaruh GRC terhadap peningkatan kapasitas panel. Pengujian dilakukan setelah mencapai umur 28 hari kemudian menggunakan UTM. Sebelum pengujian dimulai, benda uji ditempatkan pada dua tumpuan sederhana (*simply supported*) sesuai dengan konfigurasi pembebanan yang telah ditentukan. Beban kemudian diberikan secara bertahap dan kontinu hingga benda uji mengalami keruntuhan.

Selama proses pengujian, beban maksimum yang mampu ditahan oleh setiap benda uji direkam secara otomatis oleh sistem akuisisi data pada UTM. Nilai beban maksimum tersebut digunakan untuk menghitung momen lentur maksimum berdasarkan konfigurasi pembebanan. Selanjutnya, nilai tegangan lentur maksimum panel dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$f_{maks} = \frac{M_{maks.y}}{I} \quad (1)$$

Keterangan:

f_{maks} = Tegangan lentur maksimum panel (MPa);

M_{maks} = Momen lentur maksimum (MPa);

Y = Jarak serat terluar terhadap garis netral (mm).

I = Momen inersia penampang (mm^4)

$$M_{maks} = \frac{1}{8}ql^2 + \frac{1}{6}Pl \quad (2)$$

Keterangan:

M_{maks} = Momen lentur maksimum (MPa);

q = Berat panel per meter panjang (kN/m)

P = Beban terpusat (kN)

l = Panjang dinding (m)

Nilai dari kuat lentur sangat bervariasi setiap campuran, hasil pengujian ditentukan berdasarkan 3 benda uji yang lalu di ambil nilai rata-rata. Nilai rata-rata digunakan sebagai dasar dalam melakukan evaluasi pengaruh penggunaan GRC terhadap peningkatan kapasitas lentur panel dinding dengan campuran karet ban bekas.

HASIL

Panel dinding dengan mortar karet ban bekas dengan hasil yang didapatkan berat jenis tersebut merupakan beton dengan kategori ringan. Panel dinding dengan mortar ringan umumnya dirancang untuk mengurangi berat keseluruhan konstruksi dan mempermudah proses instalasi. Berat jenis material ini dapat berbeda-beda tergantung pada formulasi spesifik dari mortar ringan yang digunakan, namun umumnya berada dalam kisaran berat jenis yang lebih rendah dibandingkan dengan mortar konvensional.

Tabel 1. Berat Jenis Panel dinding

Variasi Panel Dinding	Berat Panel Benda Uji	Berat jenis Panel	Berat jenis Panel rata-rata
	Kg	kg/m ³	kg/m ³
Campuran Karet Ban Bekas	24,3	1.518,75	1.520,8
	24,4	1.525,00	
	24,3	1.518,75	
Campuran Karet Ban Bekas + GRC	24,5	1.531,25	1.535,4
	24,6	1.537,50	
	24,6	1.537,50	

Sumber: Data Olahan (2023)

Berdasarkan Tabel 1, berat jenis panel dinding tanpa GRC sebesar 1.520,8 kg/m³, sedangkan panel dengan penambahan GRC sebesar 1.535,4 kg/m³. Kedua nilai tersebut masih memenuhi kriteria beton ringan karena memiliki berat jenis di bawah 1.900 kg/m³ sesuai SNI 03-2847-2002. Pengukuran dimensi berat benda uji panel dinding dilakukan sebelum melakukan pengujian sifat mekanis. Proses pengukuran dimensi dan berat benda uji panel dinding sebelum pengujian sifat mekanis merupakan tahap penting dalam mempersiapkan material untuk evaluasi lebih lanjut. Berat jenis panel terjadi peningkatan setelah adanya penambahan GRC. Kenaikan yang terjadi yaitu sebesar 0,96%. Kategori kenaikan dengan penambahan GRC relatif kecil sehingga tidak menghilangkan karakter ringan panel. Hasil ini sejalan dengan Sumarni et al. (2025) yang menyatakan bahwa penggunaan limbah karet ban bekas mampu menurunkan berat jenis panel dinding, tetapi di sisi lain cenderung mengurangi kuat lenturnya.

Tabel 2. Berat Variasi Panel dinding

Variasi Panel Dinding	Berat Panel Benda Uji	Berat Panel	Berat Panel
	kg	kg/m ²	kg/m ²
Campuran Karet Ban Bekas	24.3	75.94	76.04
	24.4	76.25	
	24.3	75.94	
Campuran Karet Ban Bekas + GRC	24.5	76.56	76.77
	24.6	76.88	
	24.6	76.88	

Sumber: Data Olahan (2023)

Berdasarkan Tabel 2 didapatkan berat panel 76,04 kg/m² dan 76,77 kg/m² dari data tersebut lebih ringan dibandingkan hebel dan bata merah. ini menunjukkan bahwa panel tersebut memiliki berat yang ringan. Dalam konteks konstruksi, berat jenis yang lebih rendah sering diinginkan karena dapat mengurangi beban struktural pada bangunan dan mempermudah proses konstruksi. Panel yang lebih ringan dapat memberikan keuntungan dalam hal transportasi, penanganan, dan instalasi.

Namun, selain berat jenis, sifat-sifat mekanis, termal, dan kekuatan panel juga perlu diperhitungkan untuk memastikan bahwa panel memenuhi persyaratan konstruksi yang diinginkan. Jika berat jenis lebih rendah, tetapi sifat-sifat mekanisnya memadai dan memenuhi standar keselamatan dan keberlanjutan, panel tersebut dapat menjadi pilihan yang baik dalam proyek konstruksi tertentu.

Dengan terus berkembangnya teknologi material, panel dinding ringan menjadi alternatif menarik untuk proyek konstruksi. Inovasi ini menggambarkan upaya menuju bangunan yang lebih ramah lingkungan dan efisien, menciptakan masa depan konstruksi yang lebih ringan dan berkelanjutan. Seiring berjalannya waktu, diharapkan bahwa penelitian lebih lanjut dan pengembangan teknologi akan terus memperkaya pilihan material konstruksi, membawa dampak positif bagi industri konstruksi dan lingkungan.

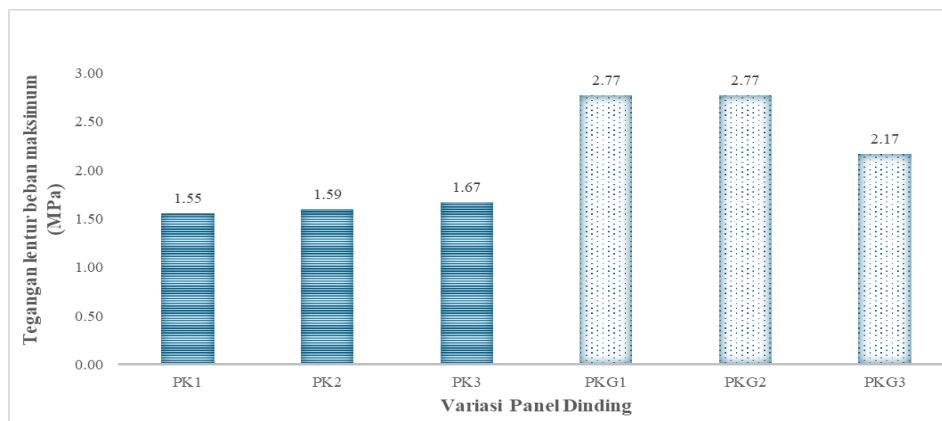
Pembahasan

Pengujian tegangan lentur pada dinding panel adalah prosedur yang dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan suatu material atau struktur untuk menahan beban lentur. Pengujian ini memberikan suatu informasi tentang panel yang dapat melengkung atau menahan beban lentur sebelum mengalami kerusakan permanen. Pengujian kuat lentur bertujuan untuk menentukan kapasitas panel dinding dalam menahan beban maksimum hingga mengalami kegagalan atau keruntuhan. Ini melibatkan aplikasi gaya lentur secara gradual hingga terjadi deformasi yang signifikan atau hingga panel mencapai batas kekuatan lenturnya. Hasil pengujian memberikan suatu informasi kritis tentang kemampuan panel untuk menahan beban lentur dan dapat diaplikasikan dalam perancangan non-struktural serta pemilihan material untuk digunakan dalam dunia proyek konstruksi.

Tabel 3. Hasil Tegangan Lentur Panel Dinding

Variasi Panel Dinding	Berat Panel Benda Uji (q) N/mm	Mmax N·mm	Tegangan Lentur (f_{maks}) MPa	Rata- Rata f_{maks} MPa
Campuran Karet Ban Bekas	0,61	258.816,67	1,55	1,61
	0,61	265.533,33	1,59	
	0,61	278.816,67	1,67	
Campuran Karet Ban Bekas + GRC	0,61	612.250,00	2,77	2,57
	0,62	612.300,00	2,77	
	0,62	478.966,67	2,17	

Sumber: Data Olahan (2023)



Gambar 2. Tegangan Lentur dengan Beban Maksimum Panel Dinding

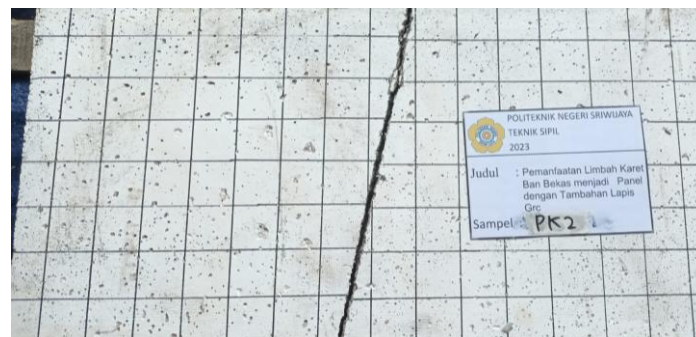
Perhitungan tegangan lentur pada benda uji PK1 dilakukan menggunakan nilai beban maksimum yang diperoleh dari pengujian. Nilai tersebut terlebih dahulu digunakan untuk menghitung momen lentur maksimum berdasarkan konfigurasi pembebanan dua titik. Selanjutnya tegangan lentur beban maksimum dihitung dengan mengalikan momen lentur maksimum yang mempunyai nilai 258.816,67 N·mm dengan jarak serat terluar terhadap garis netral dengan besaran 25 mm kemudian dibagi dengan momen inersia penampang sebesar 4166.666,67 mm⁴. Hasil perhitungan menunjukkan tegangan lentur PK1 sebesar 1,55 MPa. Berdasarkan informasi pada **Tabel 3** didapatkan tegangan lentur maksimum (kuat lentur) rata-rata untuk dua jenis panel dinding yang berbeda: panel dinding campuran karet ban bekas tanpa GRC dan panel dinding campuran karet ban bekas menggunakan GRC. Panel dinding yang terbuat dari campuran karet ban bekas tanpa tambahan GRC memiliki nilai kuat lentur rata-rata sebesar 1,61 MPa. Hal ini mencerminkan kemampuan panel untuk menahan beban lentur tanpa penambahan *Glass Reinforced Concrete* (GRC). Panel dinding yang terbuat dari campuran karet ban bekas dengan tambahan GRC memiliki nilai kuat lentur rata-rata sebesar 2,57 MPa. Penambahan GRC meningkatkan kuat lentur rata-rata panel sebesar 0,96 MPa atau sekitar 59,63%. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa GRC membantu menahan tegangan tarik dan menghambat perkembangan retak pada daerah lentur. Temuan ini mendukung hasil penelitian terdahulu bahwa material berserat dapat memperbaiki kapasitas lentur dan perilaku retak beton berkarat, meskipun efektivitasnya dipengaruhi oleh kadar karet, jenis serat, dan konfigurasi perkuatan (Devi et al., 2022; El Naggat & Abu Abdo, 2023; Albidah & Alsaif, 2024). Hasil tersebut juga sejalan dengan Tiyani et al. (2019), yang menunjukkan peningkatan kuat lentur panel setelah penggunaan lapisan GRC dan wiremesh.

Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *Glass Reinforced Concrete* (GRC) dapat mempengaruhi kemampuan panel untuk menahan beban maksimum sampai terjadi kondisi kegagalan. Hasil ini bisa diartikan bahwa penggunaan GRC pada campuran karet ban bekas memberikan kekuatan lentur yang lebih baik pada panel dinding, yang dapat menjadi faktor kunci dalam meningkatkan performa non-struktural dan daya tahan panel terhadap beban

lentur. Pada Gambar 2 untuk variasi panel dinding campuran serat karet ban bekas nilai tertinggi terdapat pada benda uji PK3 sedangkan campuran serat karet ban bekas tambahan GRC nilai tertinggi terdapat pada benda uji PKG1.



Gambar 3. Pengujian Kuat Lentur Panel Dinding



Gambar 4. Pola Retak Pada Campuran Karet tambahan GRC untuk Pengujian Kuat Lentur



Gambar 5. Pola Retak Pada Campuran Karet tambahan GRC untuk Pengujian Kuat Lentur

SIMPULAN

Panel dinding dengan campuran serat karet ban bekas 40% tanpa GRC menghasilkan tegangan lentur rata-rata sebesar 1,61 MPa, sedangkan panel dengan campuran serat karet ban bekas 40% dan tambahan GRC menghasilkan tegangan lentur pada saat beban maksimum (kuat lentur) rata-rata sebesar 2,57 MPa. Dengan demikian, penambahan GRC meningkatkan kuat lentur rata-rata panel sebesar 0,96 MPa atau sekitar 59,63%. Berdasarkan hasil pengamatan visual, keruntuhan panel ditandai oleh retak dominan pada daerah tengah bentang yang menunjukkan terjadinya mekanisme keruntuhan akibat lentur. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan GRC dapat meningkatkan kinerja lentur panel dinding non-struktural berbasis limbah karet ban bekas.

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), 5518. <https://doi.org/10.3390/ma15165518>

- Albidah, A. S., & Alsaif, A. S. (2024). Flexural response of functionally graded rubberized concrete beams. *Materials*, 17(8), 1931. <https://doi.org/10.3390/ma17081931>
- ASTM International. (2005). ASTM E72-05: Standard test method of conducting strength tests of panels for building construction. ASTM International.
- Awan, A. B., & Shaikh, F. U. A. (2021). Structural behavior of recycled tire crumb rubber sandwich panel in flexural bending. *Structural Concrete*, 22(6), 3602–3619. <https://doi.org/10.1002/suco.202100356>
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 15-2094-2000: Bata merah pejal untuk pasangan dinding. Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional. (2002). SNI 03-2847-2002: Tata cara perhitungan struktur beton untuk bangunan gedung. Badan Standardisasi Nasional.
- Bu, C., Zhu, D., Lu, X., Liu, L., Sun, Y., Yu, L., Xiao, T., & Zhang, W. (2022). Modification of rubberized concrete: A review. *Buildings*, 12(7), 999. <https://doi.org/10.3390/buildings12070999>
- Devi, C., Vijayan, D. S., Nagalingam, R., & Arvindan, S. (2022). A review of the implementations of glass fiber in concrete technology. *Materials Today: Proceedings*, 62, 2010–2015. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.293>
- El Nagggar, H., & Abu Abdo, A. M. (2023). Properties and behavior of rubberized concrete enhanced with PVA fibers. *Buildings*, 13(7), 1681. <https://doi.org/10.3390/buildings13071681>
- He, S., Jiang, Z., Chen, H., Chen, Z., Ding, J., Deng, H., & Mosallam, A. S. (2023). Mechanical properties, durability, and structural applications of rubber concrete: A state-of-the-art review. *Sustainability*, 15(11), 8541. <https://doi.org/10.3390/su15118541>
- Kilani, A. J., Ikotun, B. D., & Abdulwahab, R. (2025). Effect of crumb rubber on concrete's and mortar's structural properties: A review. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 49, 1037–1067. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01647-8>
- Liu, J., Li, J., Xu, Y., & Ma, S. (2024). Mechanical properties of cement concrete with waste rubber powder. *Applied Sciences*, 14(15), 6636. <https://doi.org/10.3390/app14156636>
- Muhammad, S., Yuan, Q., Alam, M., Javed, M. F., Rehman, M. F., & Mohamed, A. (2023). Fresh and hardened properties of waste rubber tires based concrete: A state of the art review. *SN Applied Sciences*, 5, Article 119. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05336-5>
- 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. <https://doi.org/10.21831/inersia.v16i1.31314>
- Sumarni, S., Yusti, A. P., & Habsya, C. (2025). Pengaruh substitusi agregat halus dengan limbah ban karet terhadap karakteristik mekanik dan kemampuan absorpsi suara pada panel dinding beton. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 30(2). <https://doi.org/10.14710/mkts.v30i2.65498>
- Tiyani, L., Satyarno, I., & Saputra, A. (2019). Kuat lentur panel dinding beton busa dengan lapis GRC dan wiremesh. *Teknisia*, 24(2), 72–82. <https://doi.org/10.20885/teknisia.vol24.iss2.art2>