



Pengaruh Panjang Fiber Kawat Terhadap Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang

Deka Larasati^{1*}, Ketut Aswatama W², Erno Widayanto³

^{1,2,3} Magister Teknik Sipil, Universitas Jember, Indonesia

Jl. Kalimantan Tegalboto No.37, Kec. Sumbersari, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68121

E-Mail*: dekalarasati9@gmail.com

ABSTRACT

The brittle nature of reinforced concrete when receiving tensile stress is still a challenge in structural applications. The addition of wire fiber is an innovation to improve the flexural behavior of reinforced concrete beams. This study examines the effect of variations in the length of wire fibers on the flexural behavior of reinforced concrete beams. Reinforced concrete with the addition of wire fibers has been known to increase the flexural capacity and ductility of concrete. However, the length of the fiber used can affect the distribution of fibers in the concrete mixture and affect the crack pattern and bearing capacity of the beam. This experiment was carried out with variations in the length of wire fibers of 0 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, and a combination of the three lengths. The results showed that the fiber length of 5 cm and the combination provided the highest increase in flexural capacity, reaching 10.46 MPa compared to the beam without fiber 7.85 MPa. The percentage increase in ductility ranged from 10.99% to 33.93%, with the highest increase occurring in the beam with a combination of wire fibers with a maximum deflection reaching 10.85 mm in the fiber combination, compared to 8.10 mm in the beam without fibers. The distribution of crack patterns is also more even, reducing the risk of sudden failure. These results indicate that the optimal fiber length can improve the flexural behavior of reinforced concrete while maintaining a uniform fiber distribution in the concrete matrix. This study contributes to the development of reinforced concrete material technology by providing recommendations for the optimal wire fiber length to improve structural performance.

Keywords: Reinforced Concrete, Wire Fiber, Flexural Strength, Ductility, Crack Pattern.

ABSTRAK

Sifat getas beton bertulang saat menerima tegangan tarik masih menjadi tantangan dalam aplikasi struktural. Penambahan serat kawat merupakan inovasi untuk meningkatkan perilaku lentur balok beton bertulang. Penelitian ini mengkaji pengaruh variasi panjang serat kawat terhadap perilaku lentur balok beton bertulang. Beton bertulang dengan penambahan serat kawat telah dikenal mampu meningkatkan kapasitas lentur dan daktilitas beton. Namun, panjang serat yang digunakan dapat mempengaruhi distribusi serat dalam campuran beton dan mempengaruhi pola retak serta daya dukung balok. Eksperimen ini dilakukan dengan variasi panjang serat kawat 0 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, serta kombinasi dari ketiga panjang tersebut. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panjang serat 5 cm dan kombinasi memberikan peningkatan kapasitas lentur tertinggi, mencapai 10,46 MPa dibandingkan dengan balok tanpa serat 7,85 MPa. Persentase peningkatan daktilitas berkisar antara 10.99% hingga 33.93%, dengan peningkatan tertinggi terjadi pada balok dengan kombinasi serat kawat dengan lendutan maksimum mencapai 10,85 mm pada kombinasi fiber, dibandingkan dengan 8,10 mm pada balok tanpa serat. Distribusi pola retak juga lebih merata, mengurangi risiko kegagalan mendadak. Hasil ini menunjukkan bahwa panjang serat optimal dapat meningkatkan perilaku lentur beton bertulang dengan tetap menjaga distribusi serat yang seragam dalam matriks beton. Studi ini berkontribusi pada pengembangan teknologi material beton bertulang dengan memberikan rekomendasi panjang serat kawat yang optimal untuk meningkatkan kinerja struktural.

Kata Kunci: Beton Bertulang, Serat Kawat, Kekuatan Lentur, Daktilitas, Pola Retak.

Naskah diterima 22 Maret 2025; Revisi 11 Juni 2025; Diterima 22 Desember 2025. Tanggal Publikasi 01 Maret 2026

Jurnal teknika berada pada lisensi Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License

DOI: 10.30736/jt.v18i1.91407. Hal 1 - 10



1. PENDAHULUAN

Penggunaan serat dalam beton telah menjadi fokus utama dalam peningkatan performa struktural, khususnya untuk mengatasi kelemahan beton pada zona tarik. Penelitian oleh (Jalal & Ramezaniapour., 2021) menunjukkan bahwa peningkatan rasio aspek dan kandungan serat baja secara signifikan meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang. Sementara itu, (Xie, Li & Zhang., 2020) menegaskan bahwa kombinasi beberapa jenis dan panjang serat mampu menghasilkan distribusi retak yang lebih merata serta meningkatkan ketahanan terhadap retak awal. Kajian literatur oleh (Khan & Ali., 2019) juga memperkuat bahwa penggunaan serat hibrida dengan variasi panjang memberikan efek sinergis dalam memperbaiki kekuatan lentur dan daktilitas beton. Dalam studi eksperimental lainnya, (Qureshi & Ayub., 2022) menemukan bahwa serat baja efektif dalam meningkatkan kapasitas lentur, sedangkan serat sintetis cenderung meningkatkan daktilitas, menunjukkan pentingnya pemilihan jenis dan konfigurasi serat. Penelitian terbaru oleh (Zhou, Zhao & Yu., 2023) membuktikan bahwa panjang serat yang optimal secara signifikan menunda pembentukan retak utama dan mampu mengontrol penyebaran retak, sehingga meningkatkan performa keseluruhan balok beton bertulang.

Beton bertulang merupakan salah satu material konstruksi yang paling banyak digunakan karena kemampuannya dalam menahan gaya tekan dan tarik secara bersamaan melalui kombinasi antara beton dan tulangan baja (Sudrajat, 2021). Namun, karakteristik getas beton pada zona tarik sering menjadi titik lemah yang menyebabkan retak awal dan menurunkan daya tahan struktur terhadap pembebanan, terutama beban siklik dan lentur. Untuk mengatasi kelemahan ini, berbagai upaya telah dilakukan, salah satunya adalah penambahan serat dalam campuran beton guna meningkatkan performa mekanisnya. (Putra et al., 2021; Santoso & Riyadi., 2020). Penambahan serat (*fiber*) dalam campuran beton telah banyak diteliti sebagai alternatif solusi untuk meningkatkan kinerja mekanis, terutama kekuatan lentur dan daktilitas struktur. (ACI Committee 544., 2019).

Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan serat kawat baja (*steel wire fiber*) menjadi fokus berbagai penelitian karena sifat mekaniknya yang baik serta distribusi tegangan yang lebih merata. Penelitian seperti yang dilakukan oleh (Hadi et al., 2019) dan (Wang et al., 2020) menunjukkan bahwa panjang serat kawat yang tepat dapat meningkatkan kekuatan lentur dan menghambat propagasi retak pada beton bertulang. Meski demikian, panjang serat yang berlebihan dapat menimbulkan masalah dalam proses pencampuran, seperti segregasi dan distribusi yang tidak merata, sehingga menurunkan performa struktural beton. (Sahni, S., et al., 2018).

Beberapa studi, seperti oleh (Rahmat., 2021), (Wahyudi et al., 2022), dan (Arifin., 2020) telah mengkaji pengaruh panjang dan distribusi serat terhadap perilaku lentur beton, namun belum secara spesifik meneliti interaksi panjang serat terhadap pola

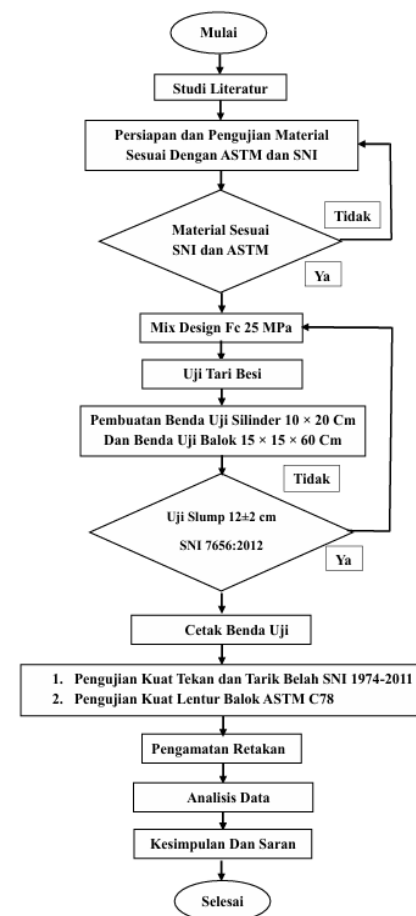
retak dan daktilitas balok beton bertulang dengan dimensi laboratorium standar.

Oleh karena itu, masih diperlukan studi yang lebih terfokus untuk menentukan panjang serat kawat optimal yang dapat meningkatkan kekuatan lentur dan daktilitas tanpa mengganggu workability dan homogenitas campuran beton.

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi panjang fiber kawat terhadap kapasitas lentur, daktilitas, serta pola retak pada balok beton bertulang. Melalui metode eksperimental di laboratorium, digunakan balok uji dengan panjang serat 0 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, dan kombinasi, untuk mengidentifikasi panjang serat yang paling efektif dalam meningkatkan performa struktural beton bertulang. Diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi nyata dalam pengembangan inovasi material beton serat lokal serta aplikasinya dalam desain struktur bangunan yang lebih efisien dan tahan lama.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi panjang serat kawat terhadap perilaku lentur balok beton bertulang. Metode penelitian yang digunakan bersifat eksperimental di laboratorium dengan pengujian langsung terhadap benda uji balok beton bertulang. Gambar 1 berikut adalah diagram Alir Penelitian.



Gambar 1. Flowchart Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan variabel bebas dengan panjang serat kawat (0 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm, dan kombinasi). Variabel terikat mencakup beban lentur maksimum, lebar retak maksimum, dan panjang retak. Dengan metode penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh rekomendasi optimal mengenai panjang serat kawat yang dapat meningkatkan kapasitas lentur dan daktilitas beton bertulang secara signifikan.

2.1 Bahan dan Proporsi Campuran

Material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi semen Portland tipe I, agregat kasar berupa kerikil, agregat halus berupa pasir, air, *superplasticizer* sebagai bahan tambahan, serta serat kawat dengan variasi panjang 0 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm dan kombinasi, bisa dilihat pada Gambar 2. Serat kawat yang digunakan berupa kawat baja lurus dengan diameter 0,5 mm. Panjang 3–5 cm dipilih berdasarkan batas efisiensi pencampuran manual dan referensi dari studi sebelumnya (Rahmat., 2021), di mana panjang lebih dari 5 cm cenderung menyebabkan aglomerasi serat dan segregasi campuran beton. Komposisi campuran beton dirancang berdasarkan standar (SNI 03-2834-2000, n.d.) dengan faktor air semen (FAS) sebesar 0,45 untuk memperoleh kuat tekan beton rencana sebesar 25 MPa.

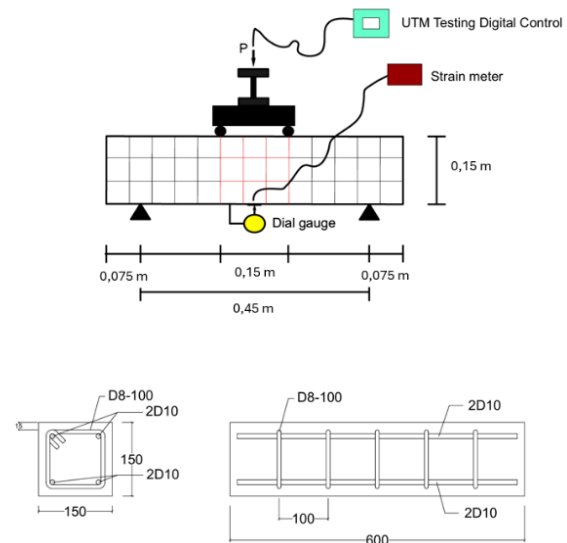


Gambar 2. Variasi Kawat

2.2 Persiapan dan Pembuatan Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari balok beton bertulang secara detail digambarkan pada Gambar 1 menunjukkan pengujian lentur (flexural test) empat titik pada balok beton bertulang berdimensi 150x150 mm dengan panjang total 600 mm. Arsitektur strukturnya menggunakan penulangan baja longitudinal 2D10 (dua batang diameter 10 mm) di sisi atas dan bawah, serta sengkang/begel D8-100 (diameter 8 mm dengan jarak antar sengkang 100 mm) untuk menahan gaya geser. Pengujian ini menggunakan alat Universal Testing Machine (UTM) dan dial gauge untuk mengukur lendutan di tengah bentang guna menganalisis

kapasitas beban dan daktilitas beton terhadap beban eksternal.



Gambar 3. Desain Balok dan Tulangan

Pembuatan benda uji dilakukan dengan mencampurkan bahan sesuai dengan proporsi *mix design*. Campuran beton dicetak ke dalam cetakan balok, dipadatkan menggunakan *vibrator*, dan dilakukan *curing* perendaman selama 28 hari sesuai dengan standar (SNI 03-4810-1998, n.d.). Untuk kebutuhan sampel benda uji bisa dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kebutuhan Sampel Beton

Kode	Kuat Tekan, Tarik Belah		Kuat Lentur
	7 Hari	28 Hari	28 Hari
0 Cm	6 Silinder	6 Silinder	1 Balok
3 Cm	6 Silinder	6 Silinder	1 Balok
4 Cm	6 Silinder	6 Silinder	1 Balok
5 Cm	6 Silinder	6 Silinder	1 Balok
Kombinasi	6 Silinder	6 Silinder	1 Balok
Total	60 Benda Uji Silinder		5 Balok

Keterangan Kode Variasi:

- 0 cm = Campuran tanpa kawat
- 3 cm = Campuran panjang kawat 3 cm
- 4 cm = Campuran panjang kawat 4 cm
- 5 cm = Campuran panjang kawat 5 cm
- Kombinasi = Campuran panjang kawat 3, 4, 5 cm

2.3 Pengujian

Penentuan kelayakan material pasir dan kerikil dalam campuran beton didasarkan pada parameter fisik seperti berat jenis, kadar lumpur, dan analisis saringan. Selain agregat, pengujian juga mencakup properti semen untuk memastikan integrasi material yang optimal. Rincian mengenai jenis pengujian beserta regulasi standarnya dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Pengujian Material Pasir dan Kerikil

No	Pengujian	Peraturan
1	Berat Jenis Pasir	SNI 1970, 2008
2	Air Resapan Pasir	SNI 1970, 2008
3	Analisa Saringan Pasir	SNI 03-1968, 1990
4	Analisa Kadar Lumpur Pasir	SNI 03-1970, 1990
5	Berat Jenis Kerikil	SNI 1970, 2008
6	Air Resapan Kerikil	SNI 1970, 2008
7	Analisa Saringan Kerikil	SNI 03-1968, 1990
8	Analisa Kadar Lumpur Kerikil	SNI 03-1970, 1990
9	Berat Volume Semen	ASTM C 188-78
10	Berat Jenis Semen	ASTM C 188-78

Pengujian Benda Uji :

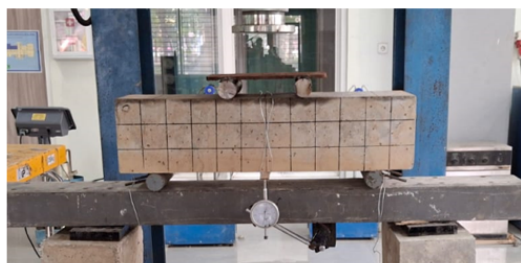
- 1) Uji *Slump*: Menilai *workability* beton menggunakan metode (ASTM C143)
- 2) Uji Kuat Tekan: Menggunakan mesin uji tekan sesuai (ASTM C39) pada umur 7 dan 28 hari.
- 3) Uji Kuat Tarik Belah: Menggunakan *split tensile test* (ASTM C496) untuk mengukur ketahanan tarik beton.
- 4) Uji Lentur: Menggunakan *four-point bending test* (ASTM C78-94., 1994) untuk mengevaluasi kapasitas lentur, lendutan maksimum, dan pola retak

Alat pengujian bisa dilihat pada Gambar 4.



Pengujian Kuat Tekan

Pengujian Tarik Belah



Pengujian Lentur

Gambar 4. Pengujian Benda Uji

2.4 Analisis Data

Hasil pengujian dianalisis menggunakan metode *statistik deskriptif* untuk membandingkan pengaruh variasi panjang serat kawat terhadap perilaku mekanis balok beton bertulang. Data beban

maksimum, kuat lentur, dan lendutan dianalisis menggunakan *regresi linier* untuk mengetahui tren hubungan antara panjang serat kawat dan peningkatan kapasitas lentur.

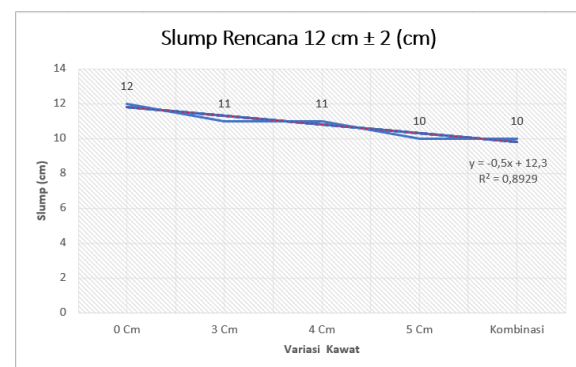
3. PEMBAHASAN

3.1 Hasil uji *slump*

Pengujian *slump* dilakukan untuk menentukan konsistensi dan kemampuan kerja (*workability*) beton segar. Standar yang digunakan dalam pengujian *slump* biasanya mengacu pada ASTM C143/C143M-15a – *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete* dan SNI 1972:2008 – *Metode Uji Slump Beton*. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan kerucut abrams, di mana tinggi *slump* diukur setelah beton segar dicetak dan dilepas dari alat uji. Untuk hasil pengujian *slump* untuk adonan cor material adalah sebagai berikut.

Tabel 3. *Slump*

<i>Slump</i> Rencana 12 cm ± 2	
Kode	<i>Slump</i> (cm)
0 Cm	12
3 Cm	11
4 Cm	11
5 Cm	10
Kombinasi	10



Gambar 5. Grafik *Slump* Beton

Dari Hasil analisis data dari Table 3 dan Gambar 5 pengujian uji *slump*. Hasil analisis menunjukkan *slump* rencana 12 cm ± 2 cm dengan batas 10 – 14 cm, dan semua campuran masih dalam rentang yang diizinkan. Penambahan fiber kawat menurunkan nilai *slump*, membuat beton lebih kaku. *Slump* tertinggi tanpa fiber adalah 12 cm, menunjukkan *workability* terbaik. Dengan fiber 3 cm dan 4 cm, *slump* turun menjadi 11 cm, sedangkan fiber 5 cm dan kombinasi mencapai 10 cm, batas bawah yang diizinkan. Kesimpulannya, fiber kawat meningkatkan kohesi beton, mengurangi kemudahan pengerjaan, tetapi tetap sesuai spesifikasi desain. Pemilihan panjang fiber harus disesuaikan dengan kebutuhan konstruksi atau ditambahkan bahan aditif seperti *superplasticizer* lebih lagi.

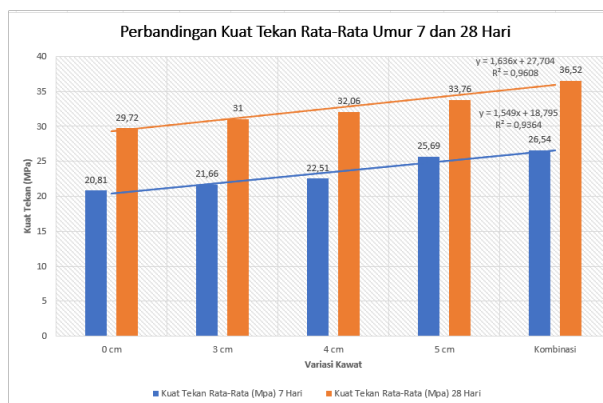
3.2 Pengaruh Serat Kawat Terhadap Kuat Tekan Dan Tarik Belah

Untuk menganalisis pengaruh serat kawat terhadap kuat tarik belah relatif terhadap kuat tekan,

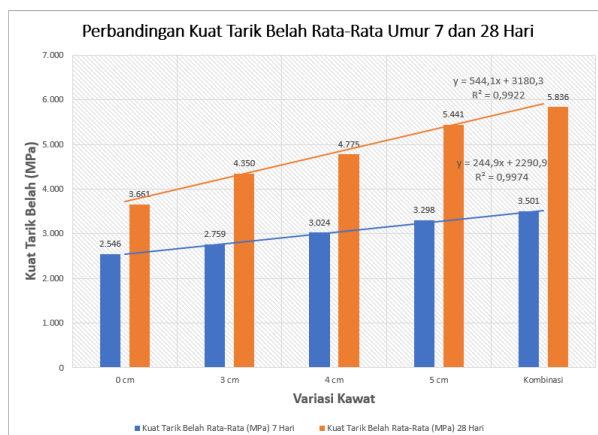
membandingkan rasio kuat tarik belah terhadap kuat tekan pada setiap kondisi dalam Tabel 4, serta Grafik dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7 dibawah ini.

Tabel 4. Rasio Kuat Tarik Belah dan Kuat Tekan

Kode	Kuat Tarik	Kuat Tekan	Rasio (%)	Kuat Tarik	Kuat Tekan	Rasio (%)
	7 Hari (MPa)	7 Hari	7 Hari	28 Hari (MPa)	28 Hari	28 Hari
0 cm	2.546	20.81	12.23	3.661	29.72	12.32
3 cm	2.759	21.66	12.74	4.350	31.00	14.03
4 cm	3.024	22.51	13.44	4.775	32.06	14.89
5 cm	3.298	25.69	12.84	5.441	33.76	16.12
Kombinasi	3.501	26.54	13.19	5.836	36.52	15.98



Gambar 6. Grafik Perbandingan Kuat Tekan Pada Beton Umur 7 dan 28 Hari



Gambar 7. Grafik Perbandingan Kuat Tarik Belah Pada Beton Umur 7 dan 28 Hari

Grafik Gambar 6 menunjukkan perkembangan kuat tekan rata-rata beton pada umur 7 dan 28 hari untuk setiap variasi serat kawat. Secara umum, terjadi peningkatan kekuatan tekan yang linier seiring

dengan bertambahnya panjang serat kawat yang digunakan, di mana nilai terendah terdapat pada variasi kontrol (0 cm) dan nilai tertinggi dicapai oleh variasi kombinasi. Data ini menunjukkan bahwa kehadiran serat kawat tidak hanya berfungsi sebagai pengisi, tetapi juga efektif meningkatkan kapasitas beban tekan beton dengan nilai korelasi yang sangat kuat ($R^2 = 0,9898$ pada 28 hari).

Peningkatan kuat tekan ini berbanding lurus dengan kemampuan beton dalam menahan beban tarik, di mana hasil pengujian menunjukkan bahwa serat kawat meningkatkan rasio kuat tarik belah terhadap kuat tekan, membuat beton lebih ulet dan tahan retak. Tanpa serat, rasio tarik belah hanya 12.23% (7 hari) dan 12.32% (28 hari). Dengan serat 3 cm, rasio meningkat menjadi 12.74% (7 hari) dan 14.03% (28 hari), dan terus naik dengan serat 4 cm hingga 14.89% (28 hari). Serat 5 cm menunjukkan sedikit penurunan awal (12.84% pada 7 hari) tetapi meningkat signifikan hingga 16.12% pada 28 hari. Kombinasi serat memberikan hasil terbaik dengan rasio 13.19% (7 hari) dan 15.98% (28 hari), menunjukkan distribusi serat yang lebih optimal. Kesimpulannya, serat kawat memperkecil selisih antara kuat tarik belah dan kuat tekan, meningkatkan ketahanan terhadap gaya tarik. Efek serat lebih signifikan pada umur 28 hari, dengan kombinasi serat menjadi opsi terbaik untuk meningkatkan kuat tarik belah secara maksimal.

3.3 Perhitungan Kapasitas Momen Keruntuhan Balok.

Berikut ini adalah hasil perhitungan kapasitas momen lentur pada benda uji balok untuk memperkirakan keruntuhan balok, yang akan digunakan dalam analisis kondisi runtuh saat pengujian beban lentur. Dapat dilihat pada Tabel 5 dibawah ini.

Tabel 5. Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser (Teoritis)

Kode	Balok Untuk Pengujian Lentur (Teoritis)					
	1 (Kapasitas Lentur)	2 (Kapasitas Geser)	3 (Beban P Saat Kapasitas Lentur Tercapai)	4 (Beban P Saat Kapasitas Geser Tercapai)	5 (Perbandingan Beban Runtuh)	6 (Jenis Keruntuhan)
	(Kgm)	(Kg)	(Ton) (1)	(Ton) (2)		
0 cm	764,69	7987,66	4,77	15,97	(2)>(1)	Runtuh lentur
3 cm	767,03	8024,06	4,79	16,04	(2)>(1)	Runtuh lentur
4 cm	768,83	8053,64	4,8	16,1	(2)>(1)	Runtuh lentur
5 cm	771,47	8100,08	4,82	16,2	(2)>(1)	Runtuh lentur
Kombinasi	775,24	8173,06	4,84	16,34	(2)>(1)	Runtuh lentur

Berdasarkan hasil uji tekan silinder dan uji tarik baja di dapat perhitungan teoritis, kapasitas lentur dan geser meningkat dengan bertambahnya panjang fiber kawat. Kapasitas lentur tertinggi pada balok kombinasi (775,238 kgm) dan terendah pada balok tanpa fiber (764,692 kgm). Kapasitas geser meningkat dari 7987,66 kg (tanpa fiber) menjadi 8173,06 kg (balok kombinasi). Beban P saat kapasitas lentur dan geser tercapai naik, tetapi kapasitas geser selalu lebih besar, menandakan semua balok mengalami keruntuhan lentur. Penambahan fiber kawat meningkatkan kapasitas, namun lebih berkontribusi pada ketangguhan material daripada kekuatan lentur. Optimasi kapasitas lentur dapat dilakukan dengan meningkatkan tulangan tarik atau modifikasi material, sedangkan perubahan mekanisme kegagalan menjadi geser memerlukan peningkatan tulangan geser atau pengaturan rasio tulangan tarik. Fiber kawat efektif meningkatkan ketahanan retak tetapi tidak cukup untuk mengubah mekanisme kegagalan, sebagaimana dibuktikan dalam pengujian aktual.

3.4 Hasil Pengujian Kuat Lentur Balok

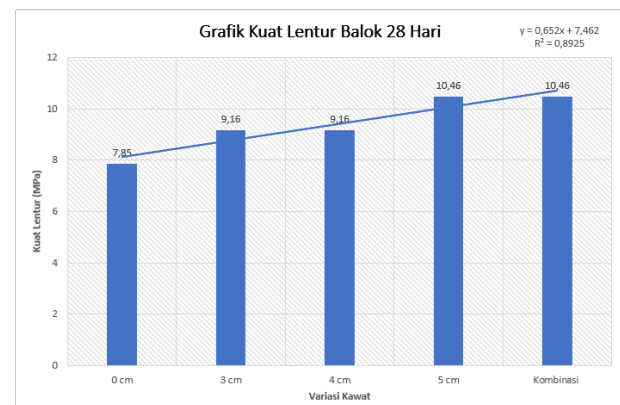
Evaluasi terhadap kapasitas lentur balok beton bertulang dilakukan untuk mengetahui sejauh mana penambahan serat kawat memengaruhi kekuatan struktur dalam menahan beban transversal. Berdasarkan pengujian beban terpusat yang dilakukan, rincian data mengenai beban maksimum dan momen lentur yang dihasilkan disajikan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Hasil Kuat Lentur Balok 28 Hari

Kode	Balok Ukuran 15 cm × 15 cm × 60 cm 28 Hari			
	Berat (Kg)	P Hancur (Ton)	P Hancur (N)	Kuat Lentur (Mpa)
0 cm	34,94	6	58,86	7,85
3 cm	34,92	7	68,67	9,16
4 cm	34,66	7	68,67	9,16
5 cm	34,86	8	78,48	10,46
Kombinasi	35,3	8	78,48	10,46

Berdasarkan Tabel 6 di atas, dapat diperoleh analisis dan kesimpulan sebagai berikut: Hubungan

peningkatan panjang fiber dengan kuat lentur. Balok tanpa fiber memiliki kuat lentur 7,85 MPa. Dengan fiber 3 cm dan 4 cm, nilai meningkat menjadi 9,16 MPa (kenaikan 16,69%). Pada fiber 5 cm dan kombinasi, kuat lentur mencapai 10,46 MPa, naik 33,12% dibandingkan beton tanpa serat. Serat kawat dengan panjang 5 cm lebih efektif dalam menjembatani retakan karena panjangnya yang cukup untuk mengikat antar bidang retak dengan baik. Panjang ini menghasilkan interlock mekanis yang lebih optimal dibandingkan serat pendek yang cenderung terlepas saat beton mengalami deformasi tinggi



Gambar 8. Grafik Kuat Lentur Balok

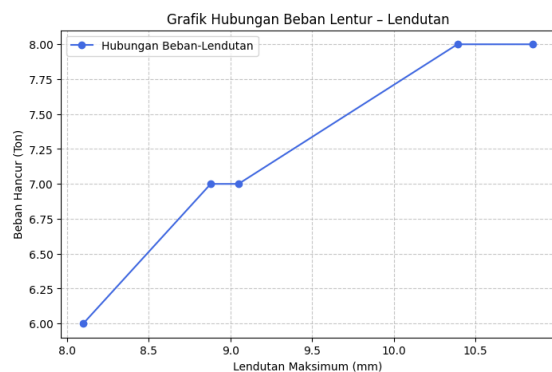
Grafik Gambar 8 menunjukkan peningkatan kuat lentur seiring bertambahnya panjang fiber hingga 5 cm. Kenaikan signifikan terjadi dari 0 cm ke 3 cm (7,85 MPa → 9,16 MPa). Namun, antara 3 cm dan 4 cm, peningkatan tidak signifikan. Peningkatan kembali terjadi pada 5 cm, menunjukkan fiber lebih panjang meningkatkan kekuatan tarik beton. Penambahan fiber kawat meningkatkan kuat lentur beton secara bertahap hingga 5 cm. Kombinasi fiber juga memberikan hasil serupa dengan fiber 5 cm, menunjukkan distribusi serat dalam beton berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan. Untuk ketahanan lentur lebih tinggi, disarankan penggunaan fiber minimal 5 cm atau kombinasi. Fiber kawat terbukti menjadi metode efektif meningkatkan performa beton bertulang terhadap beban lentur.

3.5 Hasil Hubungan Beban Lentur Terhadap Lendutan

Kapasitas daktilitas dan perilaku deformasi balok beton bertulang selama pembebanan dianalisis melalui hubungan antara beban lentur yang bekerja dengan lendutan yang dihasilkan pada tengah bentang. Fenomena ini menggambarkan kekakuan struktur serta efektivitas serat kawat dalam menahan retak, yang secara detail digambarkan melalui kurva hubungan beban-lendutan pada grafik Gambar 9 berikut serta Tabel 7:

Tabel 7. Hubungan Beban Lentur Terhadap Lendutan

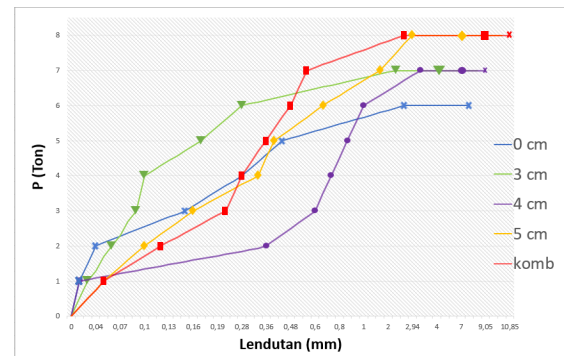
Kode	Balok Ukuran 15 cm × 15 cm × 60 cm 28 Hari			
	P Hancur (Ton)	P Hancur (N)	Dial Max (mm)	Kekakuan K (N/mm)
0 cm	6	58,86	8,1	7266.67
3 cm	7	68,67	8,88	7733.11
4 cm	7	68,67	9,05	7587.85
5 cm	8	78,48	10,39	7553.42
Kombinasi	8	78,48	10,85	7233.18



Gambar 9. Grafik hubungan beban maksimum

Hasil pengujian pada Tabel 7 di atas menunjukkan bahwa penambahan fiber kawat meningkatkan lendutan maksimum, menunjukkan peningkatan daktilitas. Tanpa fiber, lendutan maksimum 8.10 mm, sedangkan dengan kombinasi fiber meningkat menjadi 10.85 mm. Gambar 9 menunjukkan bahwa seiring bertambahnya beban lentur, lendutan meningkat, namun pada fiber 5 cm dan kombinasi, kekakuan tidak meningkat signifikan.

Balok dengan fiber memiliki kekakuan lebih tinggi dibandingkan tanpa fiber, misalnya balok tanpa fiber memiliki kekakuan 7266.67 N/mm, sementara fiber 5 cm mencapai 7553.42 N/mm. Penggunaan fiber 3-5 cm memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan dan fleksibilitas, sedangkan kombinasi fiber cenderung meningkatkan lendutan berlebihan. Kesimpulannya, fiber kawat meningkatkan daktilitas dan ketahanan terhadap deformasi, namun penggunaan berlebihan dapat mengurangi kekakuan. Komposisi optimal untuk keseimbangan kekuatan dan fleksibilitas adalah fiber dengan panjang 3-5 cm.



Gambar 10. Grafik beban lentur – lendutan hasil pengujian

Dari Gambar 10 di atas menunjukkan bahwa penambahan serat kawat meningkatkan kapasitas beban lentur dan daktilitas balok beton bertulang. Balok tanpa serat mencapai beban maksimum sekitar 6 ton dengan lendutan lebih kecil. Dengan serat 3 cm dan 4 cm, beban meningkat mendekati 7 ton, sedangkan serat 5 cm dan kombinasi mencapai 8 ton, menunjukkan peningkatan kekuatan lentur.

Balok tanpa serat mengalami deformasi lebih cepat sebelum kegagalan, sedangkan balok dengan serat menunjukkan lendutan lebih tinggi, menandakan peningkatan ketahanan terhadap retak. Kombinasi serat memberikan performa terbaik dengan beban maksimum tertinggi dan lendutan paling besar. Kesimpulannya, serat kawat meningkatkan kekuatan dan daktilitas beton, membuatnya lebih tahan terhadap deformasi sebelum retak. Balok tanpa serat lebih kaku tetapi lebih rentan terhadap kegagalan tiba-tiba, sementara penggunaan serat, terutama kombinasi panjang, memberikan efek sinergis yang meningkatkan ketahanan struktural.

3.6 Retak Awal Balok Beton Bertulang

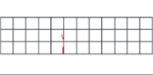
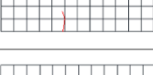
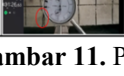
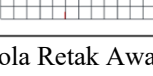
Hasil pengamatan terhadap retak awal menunjukkan bahwa panjang serat kawat berpengaruh signifikan terhadap waktu munculnya dan pola retak pada balok beton bertulang. Balok tanpa serat mengalami retak awal lebih cepat, ditandai dengan satu retakan dominan yang muncul secara vertikal di tengah bentang. Hal ini menunjukkan rendahnya kemampuan beton dalam menahan tegangan tarik di daerah momen maksimum tanpa bantuan serat.

Sebaliknya, balok dengan penambahan serat kawat menunjukkan keterlambatan munculnya retak dan pola retak yang lebih terkendali. Pada panjang serat 3 cm dan 4 cm, retakan awal tetap muncul di tengah, tetapi ukurannya lebih kecil dan tidak menjalar secepat balok tanpa serat. Penambahan serat 5 cm menunjukkan hasil paling efektif dengan retakan awal yang lebih halus, pendek, dan tersebar, menandakan bahwa serat mampu menahan propagasi awal retak melalui efek bridging dan peningkatan daktilitas.

Kombinasi panjang serat (3, 4, dan 5 cm) memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan satu

panjang serat, ditunjukkan dengan munculnya beberapa retakan kecil yang tersebar secara merata. Distribusi serat yang acak dalam campuran beton dengan panjang berbeda ini menciptakan sistem mikro-penahan yang efektif terhadap propagasi retak awal. Hal ini sejalan dengan temuan (Wahyudi et al., 2022) yang menyatakan bahwa distribusi serat yang optimal dapat menunda pembentukan retak awal dan meningkatkan kemampuan penyerapan energi.

Dengan demikian, penggunaan serat kawat, khususnya dengan panjang 5 cm atau dalam kombinasi, secara nyata meningkatkan ketahanan awal terhadap retak pada balok beton bertulang. Ini menjadi indikasi awal bahwa serat tidak hanya meningkatkan kekuatan pasca-retak, tetapi juga efektif dalam memperlambat kerusakan awal struktur beton. Dapat dilihat pada Gambar 11.

No	Kode	Foto Panjang Retak Awal	CAD Panjang Retak Awal	P (ton) Awal Retak	Panjang retak
1	0 cm			6 ton	3cm & 2cm
2	3 cm			8 ton	8 cm
3	4 cm			4 ton	5 cm
4	5 cm			7 ton	8 cm
5	komb			6 ton	3 cm

Gambar 11. Pola Retak Awal Balok Beton Bertulang

3.7 Pola Retak Akhir Balok Beton Bertulang

Pengamatan terhadap pola retak akhir pada balok setelah pengujian lentur menunjukkan bahwa variasi panjang serat kawat secara signifikan memengaruhi distribusi, arah, dan intensitas retakan yang terjadi. Balok tanpa serat menunjukkan pola retak yang dominan dan terfokus pada satu atau dua retakan besar yang menjalar secara vertikal dari tengah bentang ke arah atas. Hal ini mencerminkan sifat getas beton tanpa tulangan tambahan dalam bentuk serat, sehingga energi yang tersimpan selama proses lentur dilepaskan secara cepat dalam bentuk retakan besar.

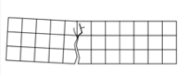
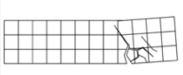
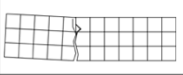
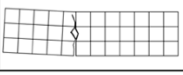
Pada balok yang mengandung serat 3 cm, pola retak cenderung masih vertikal namun dengan ukuran yang lebih kecil dan terdapat retakan tambahan yang lebih pendek di sekitar area retakan utama. Serat 4 cm menunjukkan distribusi retak yang lebih menyebar secara horizontal dan diagonal, menandakan adanya hambatan dari serat terhadap pertumbuhan dan arah penyebaran retakan.

Pola paling terkendali ditemukan pada balok dengan serat 5 cm. Pada kondisi ini, retakan yang terbentuk berjumlah lebih banyak, namun dengan panjang yang lebih pendek dan tersebar di sepanjang bentang balok. Hal ini menunjukkan bahwa serat

dengan panjang 5 cm mampu membagi energi internal menjadi lebih merata, sehingga mencegah konsentrasi tegangan yang memicu retakan besar.

Balok dengan kombinasi serat 3 cm, 4 cm, dan 5 cm menghasilkan distribusi retak terbaik, dengan banyak retakan pendek dan menyebar secara merata di seluruh area tarik. Pola ini mencerminkan sinergi antara berbagai panjang serat dalam menahan dan membatasi arah propagasi retak, serta menunjukkan efisiensi tinggi dalam mendistribusikan tegangan dalam beton.

Secara umum, semakin panjang serat yang digunakan atau semakin beragam distribusinya, maka pola retakan akhir menjadi lebih terkendali, merata, dan menunjukkan peningkatan daktilitas beton. Temuan ini memperkuat hasil penelitian sebelumnya oleh (Hadi et al., 2019) yang menyatakan bahwa serat baja meningkatkan kapasitas disipasi energi dan mengubah pola keruntuhan dari dominan getas menjadi lebih ulet. Dapat dilihat pada Gambar 12.

No	Kode	Foto Retak	CAD Retak Akhir	P (ton) Akhir Retak
1	0 cm			6 ton
2	3 cm			8 ton
3	4 cm			4 ton
4	5 cm			7 ton
5	komb			6 ton

Gambar 12. Pola Retak Akhir Balok Beton Bertulang

3.8 Analisis Perbandingan Hasil Teoritis dan Praktikum

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kapasitas lentur meningkat seiring bertambahnya panjang fiber kawat, baik secara teoritis maupun eksperimental. Secara teoritis, kapasitas lentur naik dari 764,692 kgm (0 cm) menjadi 775,238 kgm (kombinasi), sementara hasil praktikum menunjukkan peningkatan kuat lentur dari 7,85 MPa (0 cm) menjadi 10,46 MPa (kombinasi dan 5 cm).

Beban runtuh juga meningkat sesuai dengan prediksi teoritis, di mana kegagalan utama terjadi akibat lentur, bukan geser. Pengujian laboratorium menunjukkan peningkatan beban hancur dari 6 ton (0 cm) hingga 8 ton (5 cm dan kombinasi), mengonfirmasi bahwa fiber kawat efektif dalam meningkatkan kapasitas lentur dan ketahanan terhadap retak. Kesimpulannya, hasil eksperimental mendukung analisis teoritis, membuktikan bahwa penggunaan fiber kawat meningkatkan kapasitas lentur balok beton bertulang secara signifikan.

3.9 Daktilitas Balok Beton Bertulang

Analisis daktilitas dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan balok dalam mempertahankan kapasitas bebannya saat mengalami deformasi plastis yang besar sebelum terjadi keruntuhan total.

Tabel 8. Daktilitas Balok Beton Bertulang

Kode	Daktilitas	Persentase Peningkatan Daktilitas
	($\Delta u/\Delta y$)	(%)
0 cm	28.93	0%
3 cm	32.11	10.99%
4 cm	33.25	14.96%
5 cm	36.42	25.93%
Kombinasi	38.75	33.93%

Berdasarkan Tabel 8 di atas, dapat diperoleh analisis dan kesimpulan sebagai berikut, penambahan serat kawat meningkatkan daktilitas balok dibandingkan beton tanpa serat. Semakin panjang serat, semakin tinggi daktilitas yang diperoleh. Beton tanpa serat memiliki daktilitas 28,93, sedangkan nilai tertinggi pada balok dengan kombinasi serat mencapai 38,75. Peningkatan daktilitas berkisar 10,99%–33,93%, dengan peningkatan terbesar pada kombinasi serat. Serat kawat meningkatkan kemampuan beton menyerap deformasi sebelum gagal, membuatnya lebih tangguh dan tidak patah tiba-tiba. Oleh karena itu, penggunaan serat kawat dapat menjadi alternatif efektif untuk meningkatkan daktilitas beton bertulang, sehingga lebih aman dan tahan terhadap beban siklik atau gempa. Peningkatan panjang serat kawat menunjukkan hubungan sebanding terhadap nilai daktilitas. Hal ini juga tercermin pada peningkatan lendutan maksimum. Misalnya, pada panjang serat 5 cm, lendutan mencapai 10,39 mm dan daktilitas 36,42, lebih tinggi dibandingkan serat 3 cm yang hanya mencapai 8,88 mm dan daktilitas 32,11. Peningkatan panjang serat meningkatkan penyerapan energi deformasi yang berdampak langsung terhadap daktilitas.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh variasi panjang serat kawat terhadap kekuatan lentur balok beton bertulang, beberapa kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

Balok tanpa serat memiliki kuat lentur 7,85 MPa, sedangkan balok dengan serat 5 cm dan kombinasi mencapai 10,46 MPa, meningkat 33,12%. Serat 5 cm dan kombinasi memberikan peningkatan kapasitas lentur terbaik.

Daktilitas balok meningkat seiring panjang serat kawat. Balok tanpa serat memiliki daktilitas 28,93, sementara balok kombinasi mencapai 38,75, naik 33,93%. Serat kawat memperlambat keruntuhan dan meningkatkan daya tahan terhadap deformasi.

Semua balok mengalami keruntuhan lentur dengan retak dominan di tengah bentang. Balok tanpa

serat mengalami retak lebih cepat dan panjang, sedangkan balok dengan serat 5 cm dan kombinasi memiliki retakan lebih pendek, tersebar, dan terkendali. Kapasitas lentur meningkat, tetapi kegagalan tetap akibat lentur karena kapasitas geser lebih besar.

Untuk implementasi di lapangan, disarankan menggunakan serat kawat panjang 5 cm atau kombinasi 3–5 cm dengan dosis yang sesuai agar tidak mengganggu workability beton. Aplikasi ini cocok untuk elemen struktur yang memerlukan ketahanan retak tinggi seperti balok dan pelat lantai pada struktur tahan gempa.

PUSTAKA

- ACI Committee 544. (2019). Guide for specifying, proportioning, mixing, placing, and finishing steel fiber reinforced concrete (ACI 544.3R-08). American Concrete Institute.
- Arifin. (2020). Pengaruh penambahan serat terhadap kekuatan lentur beton. *Jurnal Teknik Sipil XYZ*, 15(2), 102–110.
- ASTM International. (2015). ASTM C143/C143M-15a: Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete.
- ASTM International. (2017). ASTM C188-17: Standard test method for density of hydraulic cement.
- ASTM International. (2017). ASTM C496/C496M-17: Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens.
- ASTM International. (2018). ASTM C39/C39M-18: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens.
- ASTM International. (2018). ASTM C78/C78M-18: Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading).
- Badan Standardisasi Nasional. (1990). SNI 03-1968-1990: Metode uji analisis saringan agregat halus dan kasar.
- Badan Standardisasi Nasional. (1990). SNI 03-1970-1990: Metode pengujian kadar lumpur dalam agregat halus dan kasar.
- Badan Standardisasi Nasional. (1998). SNI 03-4810-1998: Metode pengujian kuat lentur beton dengan balok satu titik pembebanan.
- Badan Standardisasi Nasional. (2000). SNI 03-2834-2000: Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1970:2008: Metode pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus dan kasar.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). SNI 1972:2008: Metode uji slump beton.
- Hadi, M. N. S., Tran, N. H., & Dao, D. K. (2019). Effects of steel fiber content and fiber aspect

- ratio on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 199, 256–265.
- Jalal, M., & Ramezaniapour, A. A. (2021). Effects of steel fiber content and aspect ratio on the flexural performance of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 272, 121942.
- Khan, M., & Ali, M. (2019). Hybrid fibers effect on mechanical properties of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 228, 116766.
- Putra, D. W., Santoso, A., & Riyadi, H. (2021). Studi eksperimental pengaruh serat pada campuran beton terhadap kekuatan lentur. *Jurnal Konstruksi Beton Indonesia*, 8 (1), 45–52.
- Qureshi, L. A., & Ayub, T. (2022). Flexural performance of reinforced concrete beams incorporating steel and synthetic fibers. *Materials*, 15(4), 1526.
- Rahmat. (2021). Efek panjang serat baja terhadap kinerja beton. *Jurnal Struktur dan Konstruksi*, 12(3), 212–220.
- Sahni, S., Singh, S. P., & Bhattacharjee, B. (2018). Influence of steel fiber content on properties of high strength fiber reinforced concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 6576–6583.
- Santoso, A., & Riyadi, H. (2020). Pemanfaatan serat baja sebagai bahan tambah beton bertulang. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 9(2), 134–140.
- Sudrajat, E. (2021). Pengaruh Temperatur Panas Beton Terhadap Perubahan Fisik Dan Kuat Tekan Beton K-250. *Jurnal Teknik*, 13(1), 47–51.
<https://doi.org/https://doi.org/10.30736/jt.v13i1.595>
- Wahyudi, R., Haryanto, B., & Lestari, P. (2022). Pengaruh variasi panjang dan distribusi serat terhadap daktilitas balok beton. *Jurnal Rekayasa Struktur*, 11(4), 345–354.
- Wang, Y., Li, V. C., & Wu, H.-C. (2020). Fiber length effects on crack bridging behavior in engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 30(6), 1007–1011.
- Zhou, X., Zhao, Y., & Yu, J. (2023). Experimental study on crack control of concrete beams with different fiber lengths. *Journal of Building Engineering*, 70, 106351.