

## STUDI NUMERIK KINERJA PERKUATAN GESER BALOK TINGGI MENGUNAKAN CARBON FIBER REINFORCED POLYMERS (CFRP)

HOSBIRAHMAN PUTRA<sup>1</sup>, RUDDY KURNIAWAN<sup>2</sup>, RENDY THAMRIN<sup>3</sup>

Teknik Sipil, Teknik, Universitas Andalas<sup>1,2,3</sup>

Email: hosbirahmanputra@gmail.com<sup>1</sup>, ruddykurniawan@eng.unand.ac.id<sup>2</sup>,  
rendythamrin@eng.unand.ac.id<sup>3</sup>

\*Corresponding Author: ruddykurniawan@eng.unand.ac.id<sup>2</sup>

**Abstrak:** Balok tinggi beton bertulang merupakan elemen struktur yang bekerja pada daerah diskontinuitas tegangan, sehingga perilakunya berbeda dengan balok konvensional dan cenderung mengalami kegagalan geser sebelum kapasitas lentur tercapai. Perkuatan menggunakan *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) menjadi salah satu solusi potensial karena memiliki kekuatan tarik tinggi, bobot ringan, dan kemudahan pemasangan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh perkuatan geser menggunakan CFRP terhadap kapasitas beban, lebar retak maksimum, daktilitas, energi disipasi, dan perilaku pasca-puncak balok tinggi beton bertulang, serta mengevaluasi efektivitas berbagai konfigurasi perkuatan. Metode penelitian dilakukan melalui pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga berbasis nonlinier dengan perangkat lunak ATENA 2D. Model uji balok tinggi yang digunakan mengacu pada benda uji hasil penelitian eksperimental Akkaya et al. (2022), berupa balok tinggi dengan perletakan sendi-rol dan beban terpusat di tengah bentang. Untuk menyederhanakan perhitungan numerik, pemodelan dilakukan pada setengah bentang balok karena geometri dan pembebanan bersifat simetris. Variasi model meliputi dua nilai perbandingan bentang geser terhadap tinggi efektif ( $A_v/d = 2$  dan  $A_v/d = 1,5$ ). Masing-masing balok tinggi diperkuat CFRP dengan tiga variasi jarak antar lembaran, yaitu 5 cm, 10 cm, dan full wrap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perkuatan CFRP secara signifikan meningkatkan kapasitas beban pada seluruh tahap pembebanan, dan mengubah mekanisme keruntuhan menjadi lebih daktil. Konfigurasi perkuatan penuh dengan jarak strip minimum memberikan kinerja terbaik, dengan peningkatan kapasitas geser dan daktilitas tertinggi, serta energi disipasi yang lebih besar dibandingkan balok tanpa perkuatan. Selain itu, balok yang diperkuat CFRP mempertahankan kapasitas beban yang lebih stabil setelah melewati beban maksimum, menunjukkan perilaku pasca-puncak yang lebih baik dan ketahanan lebih tinggi terhadap keruntuhan mendadak.

**Kata kunci :** Balok tinggi, CFRP, Perkuatan Geser, Metode Elemen Hingga, ATENA 2D, Energi Disipasi, Perilaku Pasca-Puncak Pendahuluan

### A. Pendahuluan

Balok tinggi didefinisikan sebagai komponen struktur dengan beban bekerja pada salah satu sisinya dan perletakan pada sisi lainnya, sehingga strut tekan dapat berbentuk diantara beban dan perletakan. Balok tinggi juga didefinisikan sebagai balok dengan bentangan bersih  $L_n$  tidak lebih dari empat kali tinggi balok ( $h$ ) untuk pembebanan merata, atau dua kali tinggi efektif balok ( $2d$ ) dari muka perletakan untuk balok dengan pembebanan terpusat (SNI 2847:2019).

Balok tinggi digunakan dalam berbagai aplikasi struktural seperti struktur lepas pantai, transfer girder, pondasi dinding, pilecap pondasi, bangunan tinggi, dan dinding geser. Beberapa penelitian terdahulu membuktikan bahwa pola retak dominan yang terjadi pada balok tinggi adalah pola retak geser, dimana pada saat beban bekerja tulangan geser maupun tulangan lentur mulai mengalami leleh maka beton mulai mengalami retak awal (*initial crack*) pada zona tekan di dekat tumpuan dan retak terus menjalar ke daerah beban sehingga pada akhirnya balok tinggi mengalami kegagalan geser (Darma & Paryati, 2019).

Balok tinggi memiliki kekuatan lentur yang sangat baik jika dibandingkan dengan kekuatan geser. Kegagalan geser pada dasarnya terjadi pada balok tinggi karena pengaruh konfigurasi dimensinya. Jika tinggi penampang balok meningkat, maka kekuatan geser menurun. Oleh karena itu kemampuan menahan geser perlu ditingkatkan pada balok tinggi tanpa menambah tinggi dari penampang balok (Meena et al., 2021).

Kebutuhan untuk memperkuat balok tinggi beton bertulang disebabkan oleh beberapa faktor, diantaranya perubahan peraturan (*code*), peningkatan beban desain, kondisi lingkungan yang parah, dll. Dalam segi biaya dan waktu, perkuatan biasanya lebih menguntungkan. Dalam dua dekade, penelitian telah dilakukan dengan dua metode perkuatan yang berbeda. Yang pertama adalah serat baja sebagai bahan campuran beton, yang bertujuan untuk meningkatkan kekuatan dan kapasitas deformasi beton pada balok. Metode perkuatan yang kedua adalah dengan mengikat serat baja polimer (FRP) diluar balok beton. Metode ini merupakan salah satu metode perkuatan yang paling efisien untuk banyak elemen struktural seperti kolom, balok, pelat, dan dinding. Selain itu, elemen struktur yang mungkin memiliki bukaan karena kebutuhan, membuat tahanan geser pada struktur menjadi berkurang, dalam kasus ini FRP sering digunakan sebagai bahan perkuatan (Akkaya et al., 2022).

Material *Fiber Reinforced Polymer* (FRP) memiliki berbagai keunggulan seperti tidak korosif, non-magnetik, tahan terhadap berbagai jenis bahan kimia, rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi, kemudahan dalam penggunaan, serta modulus tarik yang tinggi. Jenis material pada FRP yang sering digunakan adalah karbon (C), kaca (G), dan aramid (A).

Perkuatan geser menggunakan FRP biasanya menggunakan tiga skema, yaitu *full wrapping* (FW), *U-wrapping* (U), dan *side bonding* (S). Pada penelitian Al-fakih et al. (2021) menunjukkan bahwa pelat CFRP merupakan bahan yang cocok untuk perkuatan lentur balok ramping, karena peningkatan kapasitas lentur. Perkuatan geser pada balok ramping dengan bahan FRP memberikan hasil yang baik dalam menambah kapasitas geser, dan mengurangi lendutan. Ditemukan bahwa perkuatan dengan skema FW, U, dan S mempengaruhi kinerja balok terhadap geser (Akkaya et al., 2022).

Studi penggunaan material FRP dalam perkuatan geser balok ramping telah banyak dilakukan, namun studi yang menggunakan perkuatan FRP pada balok tinggi ( $av/d \leq 2$ ) masih jarang dilakukan. Selain itu, studi eksperimental dan numerik pada balok tinggi yang diperkuat dengan FRP sebagian besar dilakukan dengan skema perkuatan *Side bonding* (S) dan *U-wrapping* (U). Studi tersebut menunjukkan bahwa kekuatan geser meningkat sekitar 10-70%. Selain itu, tingkat kerusakan akibat geser lebih lambat dibandingkan dengan balok tanpa perkuatan. Dari beberapa penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa pengaruh  $av/d$  merupakan faktor penting untuk menentukan perilaku geser balok tinggi yang diperkuat.

Seiring dengan semakin tingginya tuntutan kinerja struktur, khususnya pada elemen balok tinggi yang sering bekerja di daerah diskontinuitas tegangan, diperlukan strategi perkuatan yang tidak hanya meningkatkan kapasitas beban, tetapi juga mampu mengendalikan retak, memperbaiki daktilitas, serta menjaga kinerja struktur setelah melewati beban maksimum. *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) menjadi salah satu pilihan yang potensial berkat kekuatan tarik yang tinggi, berat yang ringan, dan kemudahan pemasangan. Namun, efektivitas CFRP dalam meningkatkan kapasitas geser, mengendalikan perkembangan retak, serta memengaruhi perilaku pasca-puncak pada balok tinggi memerlukan kajian yang terukur dan sistematis. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini dirancang untuk menganalisis secara mendalam pengaruh perkuatan geser menggunakan CFRP terhadap perilaku balok tinggi beton bertulang melalui pemodelan elemen hingga, yang hasilnya diharapkan dapat memberikan manfaat ilmiah, praktis, dan aplikatif bagi pengembangan teknologi perkuatan struktur beton bertulang.

## B. Metoda Penelitian

Model balok tinggi yang digunakan pada studi ini diadopsi dari studi eksperimental yang dilakukan oleh Akkaya dkk. (2022). Balok dengan panjang 1500 mm, tinggi 300 mm dan lebar 140 mm, dengan perkuatan CFRP dibagi menjadi dua variasi, yaitu variasi jarak antar CFRP dan variasi bentang geser balok ( $a_v$ ), seperti terlihat pada **Error! Reference source not found.** Dimana  $w_f$ ,  $t_f$  dan  $A_{frp}$  adalah lebar, tebal, dan luas lembaran CFRP.  $S_f$  adalah jarak antar lembaran CFRP, dan  $a_v/d$  adalah perbandingan bentang geser dengan tinggi penampang balok.

Ada 2 tipe sampel yang akan dianalisis, yaitu balok tinggi tanpa perkuatan (UDB) dan balok tinggi dengan perkuatan (SDB) diikuti nilai  $a_v/d$  untuk menunjukkan bentang geser balok terhadap tinggi penampang. Serial "R" menunjukkan bahwa itu adalah balok referensi.

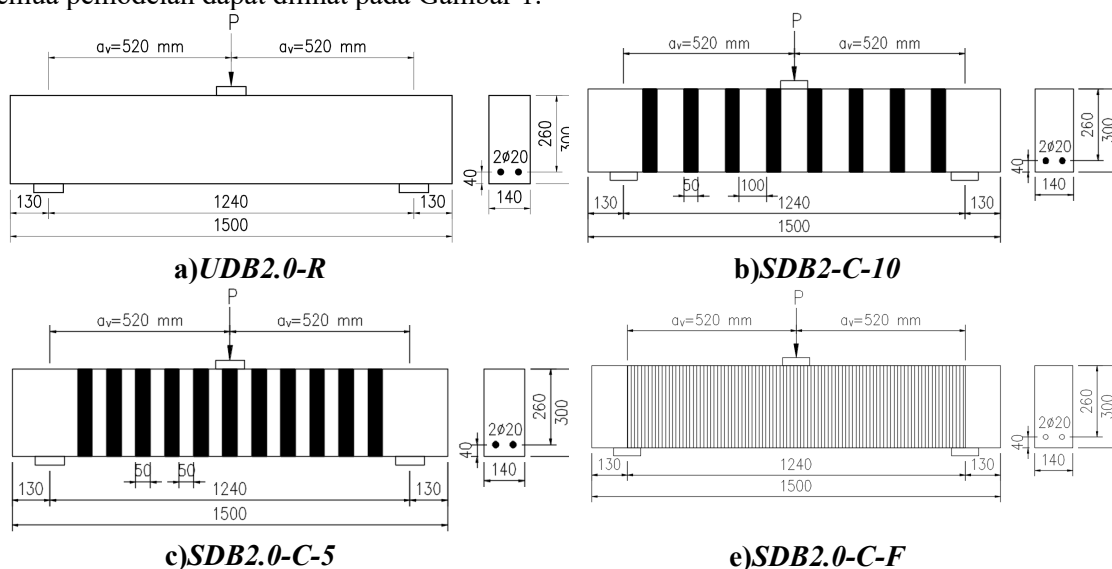
Serial “C” menunjukkan perkuatan yang digunakan adalah CFRP dengan 1 lapisan. Angka terakhir “10” atau “5” menunjukkan jarak antar lembaran FRP dalam sentimeter (cm) sedangkan “F” menunjukkan lembaran CFRP penuh di sepanjang bentang geser (*full wrap*). Sebagai contoh, SDB2.0-C-10 merujuk pada balok tinggi yang diperkuat (SDB) dengan  $a_v/d$  adalah 2, dengan perkuatan geser vertikal dan horizontal, diperkuat dengan satu lapis lembaran CFRP yang memiliki jarak antar lembaran adalah 100 mm.

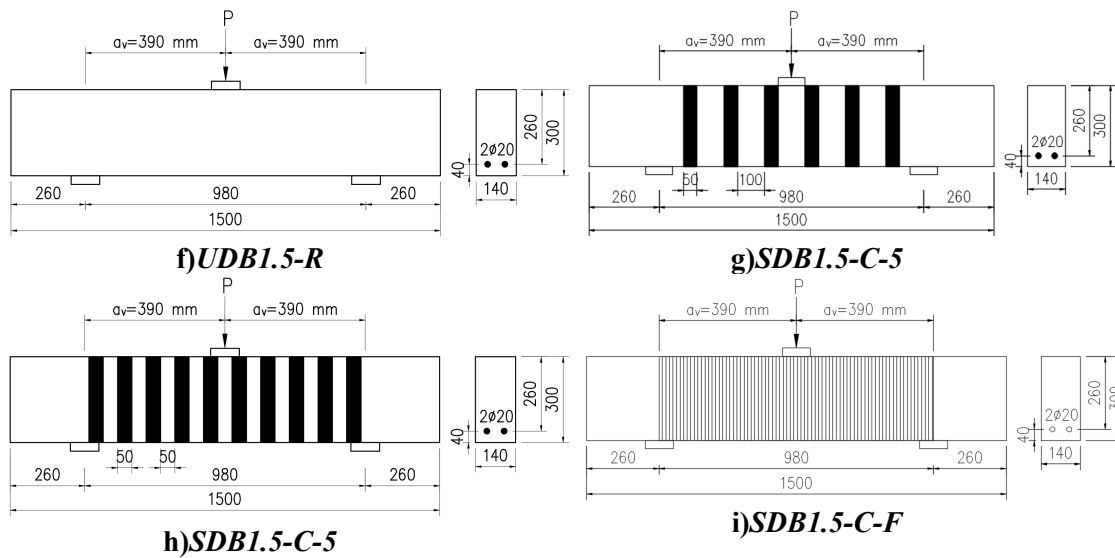
Tabel 1. Propertis Balok

No.	Nama Pemodelan	wf (mm)	sf (mm)	tf (mm)	av/d	Afrp (mm <sup>2</sup> )
1	UDB2.0-R	-	-	-	2	-
2	SDB2.0-C-10	50	100	0.34	2	15
3	SDB2.0-C-5	50	50	0.34	2	15
4	SDB2.0-C-F	50	0	0.34	2	15
5	UDB1.5-R	-	-	-	1.5	-
6	SDB1.5-C-10	50	100	0.34	1.5	15
7	SDB1.5-C-5	50	50	0.34	1.5	15
8	SDB1.5-C-F	50	0	0.34	1.5	15

Sampel balok tinggi pada studi ini menggunakan tulangan lentur sebanyak 2 buah dengan diameter 20 mm (2D22). Dengan kuat leleh ( $f_y$ ), kuat tarik ( $f_t$ ), dan modulus elastisitas ( $E$ ) adalah masing-masing 548 MPa, 647 MPa, dan 200 GPa. Sampel balok tinggi tidak menggunakan tulangan geser (senggang), karena penelitian ini hanya meninjau bagaimana pengaruh perkuatan CFRP saja terhadap balok. Selanjutnya, kuat tekan beton ( $f_c'$ ) pada penelitian ini adalah 36 MPa.

Lembaran CFRP memiliki lebar 50 mm dan ketebalan 0.34 mm yang dipasang di setiap sisi balok (*fully wrapping*) dengan jarak antar lembaran CFRP adalah 100 mm dan 50 mm. Luasan satu lapis perkuatan CFRP ( $A_{frp}$ ) adalah 15 mm<sup>2</sup>. Modulus elastisitas CFRP adalah 255 GPa, kuat tarik 4400 MPa dan ketebalan adalah 0.34 mm. Untuk detail semua pemodelan semua pemodelan dapat dilihat pada Gambar 1.



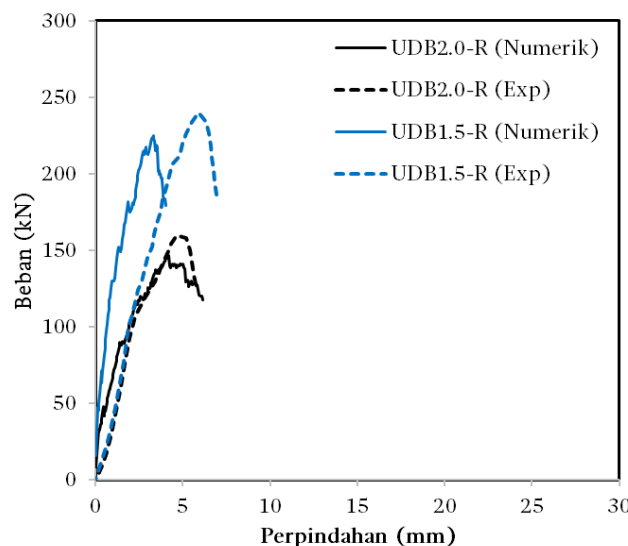


Gambar 1. Sketsa Elemen Balok Tinggi untuk Pemodelan

### C. Hasil dan Pembahasan

#### Hasil Analisis Numerik vs Hasil Eksperimental Balok Referensi

Pemodelan numerik yang dibandingkan dengan pengujian eksperimental adalah balok tinggi tanpa perkuatan, dengan kode model adalah “SDB”, dimana balok tersebut sebagai balok referensi, yaitu balok yang akan diberi perkuatan dan dianalisis secara numerik menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ATENA 2D. Ada dua buah model balok tinggi yang akan dibandingkan perilaku strukturnya yaitu balok dengan kode UDB2.0-R dan UDB1.5-R. Setelah dilakukan perhitungan dengan metode numerik berbasis elemen hingga, hasil pemodelan numerik dibandingkan dengan hasil dari pengujian eksperimental dari Akkaya *et al.* (2022) berupa grafik beban – perpindahan, seperti dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perbandingan Grafik Beban-Perpindahan antara Pemodelan Elemen Hingga dengan Hasil Eksperimental

Perbedaan hasil yang diperoleh antara metode numerik menggunakan pemodelan elemen hingga berbantuan perangkat lunak ATENA 2D dan metode eksperimental melalui pengujian laboratorium pada benda uji nyata umumnya disebabkan oleh kombinasi faktor idealisasi model, asumsi material, serta kondisi pengujian. Dalam analisis numerik, sifat material seperti kuat tekan beton, modulus elastisitas, dan kuat leleh baja tulangan dimasukkan sebagai nilai homogen dan isotropis, sedangkan pada pengujian nyata material memiliki variasi sifat akibat cacat mikro, porositas, dan ketidaksempurnaan distribusi agregat. Model

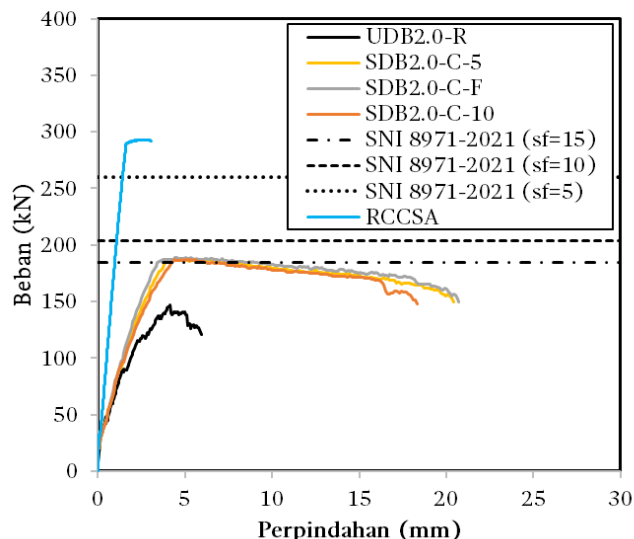
konstitutif beton yang digunakan di ATENA 2D, meskipun telah mempresentasikan perilaku nonlinear dan retak, tetap tidak sepenuhnya mampu menangkap kompleksitas perkembangan retak mikro hingga retak makro sebagaimana terjadi pada pengujian fisik. Selain itu, kondisi batas pada pemodelan dibuat ideal (misalnya tumpuan sendi atau rol sempurna), sementara pada pengujian nyata terdapat pengaruh gesekan, deformasi lokal pada tumpuan, atau sedikit *slip* pada alat pembebanan. Dan, masih banyak faktor yang mempengaruhi perbedaan ini.

Secara keseluruhan, perbedaan ini menunjukkan bahwa model numerik merupakan representasi ideal dari struktur, sedangkan pengujian eksperimental merepresentasikan kondisi lapangan yang sarat dengan variabilitas dan ketidaksempurnaan, sehingga meskipun tren perilaku struktur dapat terwakili, perbedaan kuantitatif pada nilai perpindahan dan beban maksimum tetap mungkin terjadi.

### **Balok Tinggi dengan $A_v/d=2$**

#### **Kurva Beban-Perpindahan**

Kurva beban-perpindahan yang dibahas pada subbab ini merupakan hasil perhitungan numerik menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak ATENA 2D. Kurva ini menggambarkan hubungan antara besarnya beban yang diterima balok dengan perpindahan yang terjadi pada titik pengamatan. Analisis kurva ini digunakan untuk mengevaluasi kekakuan, kapasitas beban maksimum, dan perilaku pasca-puncak, serta menilai kemampuan struktur dalam mendisipasi energi. Analisis terhadap kurva ini memberikan pemahaman mengenai respons struktural balok pada berbagai variasi perkuatan yang diuji.



Gambar 3. Kurva Beban-Perpindahan Balok Tinggi ( $A_v/d=2$ ) dengan Variasi Perkuatan CFRP

Berdasarkan perbandingan antara hasil analisis numerik menggunakan ATENA2D dan hasil perhitungan analitik sesuai SNI 8971:2021, diperoleh bahwa kapasitas beban maksimum balok tinggi hasil analisis numerik secara konsisten lebih rendah dibandingkan dengan kapasitas yang diprediksi secara analitik. Perbedaan ini diduga berkaitan dengan perbedaan pendekatan kedua metode, dimana analisis numerik mampu merepresentasikan perilaku nonlinier material dan kerusakan secara lebih rinci, termasuk pembentukan retak diagonal, degradasi kekakuan beton pasca-retak, serta kemungkinan terjadinya kegagalan lokal pada strut beton.

Selanjutnya, analisis menggunakan perangkat lunak *Reinforced Concrete Cross Section Analysis* (RCCSA) yang berbasis analisis perilaku lentur pada penampang beton bertulang dilakukan untuk memprediksi kapan penampang balok mengalami kegagalan lentur. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa penampang balok tinggi ini akan mengalami kegagalan lentur pada beban  $\pm 290$  kN. Analisis ini mempertegas bahwa balok ini belum mengalami kegagalan lentur meskipun sudah diberi perkuatan CFRP dengan berbagai konfigurasi perkuatan.

### Kekakuan dan Energi Disipasi Kekakuan

Analisis kekakuan balok dilakukan dengan membandingkan nilai kekakuan dari beberapa model hasil pemodelan numerik. Nilai kekakuan diperoleh dari perbandingan beban leleh terhadap perpindahan leleh yang ditentukan menggunakan metode *elasto-plastic equivalent*. Presentase kekakuan dihitung dengan membandingkan nilai kekakuan setiap model terhadap model referensi (UDB2.0-R). Hasil rekapitulasi perhitungan kekakuan dan presentase peningkatan kekakuan ditunjukkan pada **Tabel 2**.

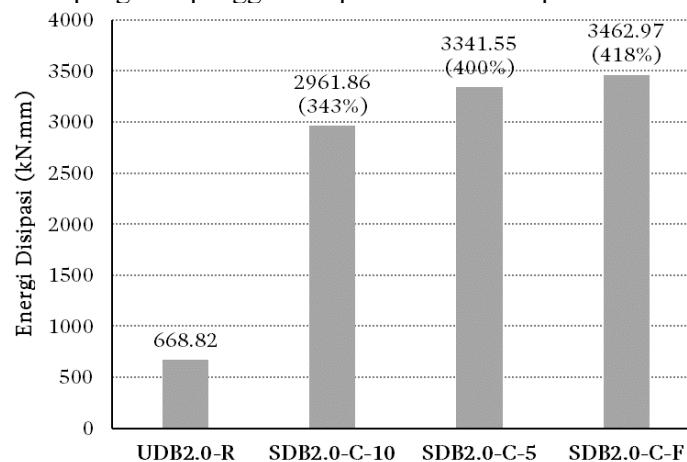
Tabel 2. Nilai Kekakuan dan Presentase Peningkatan Kekakuan Balok dari Hasil Analisis

Nama Model	$\Delta y$ (mm)	$P_y$ (kN)	Kekakuan (kN/mm)	Persentase Kekakuan
UDB2.0-R	2.80	122.10	43.64	0%
SDB2.0-C-10	3.23	160.60	49.72	14%
SDB2.0-C-5	3.05	162.74	53.34	22%
SDB2.0-C-F	2.87	165.86	57.76	32%

Peningkatan ini menunjukkan bahwa modifikasi konfigurasi dan detail perkuatan pada balok berpengaruh langsung terhadap kekakuan struktur, dengan model SDB2.0-C-F sebagai konfigurasi paling efektif dalam meningkatkan kekakuan. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan parameter desain tertentu dapat secara substansial meningkatkan kinerja elemen struktur terhadap deformasi.

### Energi Disipasi

Energi disipasi pada struktur balok menggambarkan kemampuan elemen tersebut untuk menyerap dan melepas energi selama mengalami deformasi plastis, sehingga menjadi indikator ketangguhan struktur dalam menahan beban berlebih sebelum mencapai keruntuhan. Gambar 4 memperlihatkan perbandingan nilai energi disipasi yang diperoleh dari hasil analisis numerik untuk berbagai variasi. Model UDB2.0-R benda uji acuan yang tidak menggunakan perkuatan CFRP, dengan nilai energi disipasi sebesar 668,82 kN·mm. Nilai ini menjadi *baseline* untuk menilai pengaruh penggunaan perkuatan CFRP pada variasi benda uji lainnya.

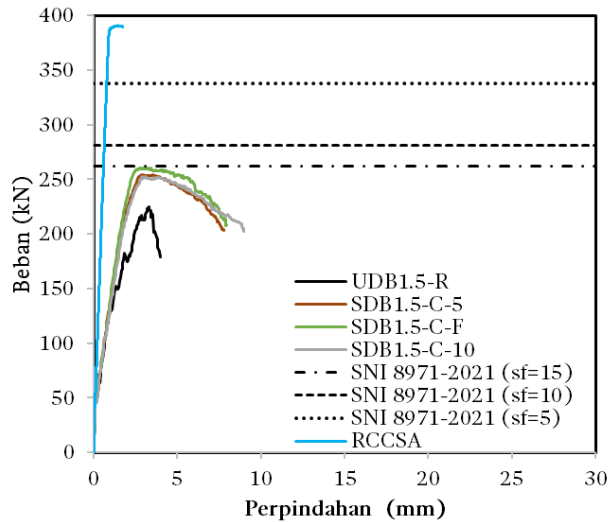


Gambar 4. Peningkatan Energi Disipasi dari Hasil Analisis Numerik

Penerapan perkuatan CFRP pada model SDB2.0-C-10 menghasilkan peningkatan energi disipasi menjadi 2961,86 kN·mm, atau sekitar 343% lebih besar dibandingkan spesimen acuan. Variasi SDB2.0-C-5 dan SDB2.0-C-F menunjukkan peningkatan yang lebih tinggi lagi, masing-masing mencapai 3341,55 kN·mm dan 3462,97 kN·mm. Tren ini memperlihatkan bahwa penambahan perkuatan CFRP tidak hanya meningkatkan kekuatan struktur, tetapi juga memperbesar kemampuan deformasi plastis sebelum kegagalan, sehingga energi yang dapat diserap meningkat signifikan.

**Balok Tinggi dengan  $A_v/d=1.5$   
 Kurva Beban-Perpindahan**

Gambar 5 menyajikan kurva hubungan beban–perpindahan hasil analisis numerik untuk balok dengan rasio  $A_v/d = 1,5$  beserta variasi perkuatannya menggunakan CFRP. Hubungan beban–perpindahan ini menggambarkan respons struktur mulai dari fase elastis, leleh, hingga penurunan kekuatan akibat kerusakan material.



Gambar 5. Kurva Beban-Perpindahan Balok Tinggi ( $A_v/d=1.5$ ) dengan Variasi Perkuatan CFRP

**Kekakuan dan Energi Disipasi**

**Kekakuan**

Analisis kekakuan balok dilakukan dengan membandingkan nilai kekakuan dari beberapa model hasil pemodelan numerik. Nilai kekakuan diperoleh dari perbandingan beban leleh terhadap perpindahan leleh yang ditentukan menggunakan metode *elasto-plastic equivalent*. Presentase kekakuan dihitung dengan membandingkan nilai kekakuan setiap model terhadap model referensi (UDB1.5-R). Hasil rekapitulasi perhitungan kekakuan dan presentase peningkatan kekakuan ditunjukkan pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Nilai Kekakuan dan Presentase Peningkatan Kekakuan Balok dari Hasil Analisis

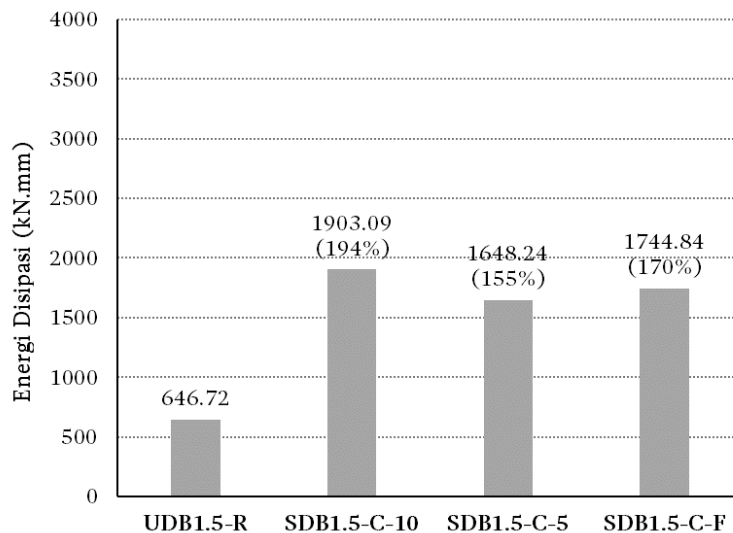
Nama Model	$\Delta y$ (mm)	$P_y$ (kN)	Kekakuan (kN/mm)	Persentase Kekakuan
UDB1.5-R	2.12	180.90	85.39	0%
SDB1.5-C-10	2.04	219.12	107.67	26%
SDB1.5-C-5	1.99	222.99	112.14	31%
SDB1.5-C-F	1.92	228.63	118.83	39%

Secara kuantitatif, tren pada grafik memperlihatkan hubungan positif antara penerapan perkuatan CFRP dan peningkatan kekakuan struktur. Setiap variasi konfigurasi perkuatan memberikan kontribusi yang terukur terhadap peningkatan kekakuan, dimana perkuatan penuh (*full wrap*) menghasilkan efek paling signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan perkuatan CFRP yang tepat dapat meningkatkan performa kekakuan hingga hampir 40% tanpa mengorbankan integritas desain.

**Energi disipasi**

Energi disipasi merupakan parameter penting dalam menilai ketahanan struktur terhadap beban siklik, khususnya pada kondisi pembebanan gempa. Parameter ini merepresentasikan kemampuan elemen struktur dalam menyerap dan menguraikan energi input melalui deformasi plastis serta mekanisme redaman internal. Nilai energi disipasi yang

tinggi umumnya berkorelasi positif dengan peningkatan kapasitas daktilitas dan ketangguhan struktur.



Gambar 6. Peningkatan Energi Disipasi dari Hasil Analisis Numerik

Hasil ini menunjukkan bahwa perkuatan CFRP pada model numerik secara konsisten meningkatkan kapasitas disipasi energi. Menariknya, konfigurasi jarak 10 cm menghasilkan kinerja terbaik, yang mengindikasikan bahwa pola pemasangan mempengaruhi efektivitas perkuatan, bukan hanya jumlah material yang digunakan.

#### D. Penutup

Berdasarkan hasil pemodelan elemen hingga dan analisis yang telah dilakukan pada studi mengenai perkuatan geser balok tinggi beton bertulangan menggunakan CFRP, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemasangan CFRP pada balok tinggi secara signifikan meningkatkan kapasitas beban pada seluruh tahap pembebanan. Peningkatan beban puncak pada balok dengan bentang  $Av/d=2$  adalah sekitar 28%, sedangkan balok dengan bentang geser  $Av/d=1.5$  adalah 12-16%. Namun, besaran bentang geser balok tinggi mempengaruhi perilaku struktur balok setelah diberi perkuatan CFRP, dimana dengan bentang geser  $Av/d=2$  dapat menyerap energi lebih baik dan penambahan kekuatan puncak lebih besar dibandingkan balok dengan bentang geser  $Av/d=1.5$ .
2. Balok tinggi yang diperkuat CFRP menunjukkan peningkatan energi disipasi yang signifikan dibandingkan balok tanpa perkuatan, menandakan kemampuan struktur untuk menyerap dan melepaskan energi beban sebelum keruntuhan lebih baik. Peningkatan energi disipasi pada balok dengan bentang geser  $Av/d=2$  adalah 300-400%, sedangkan pada balok dengan bentang geser  $Av/d=1.5$  adalah 150-200%. Pada perilaku pasca-puncak (*post-peak*), balok tanpa perkuatan mengalami penurunan kapasitas yang tajam setelah beban maksimum tercapai, sedangkan balok dengan CFRP mempertahankan kapasitas beban lebih tinggi pada rentang deformasi yang lebih besar, sehingga menunjukkan perilaku yang lebih daktil dan ketahanan struktural yang lebih baik terhadap keruntuhan mendadak.
3. Pengaruh konfigurasi CFRP, yaitu perbedaan jarak antar CFRP, tidak signifikan terhadap perilaku struktur balok tinggi. Baik dari segi kekakuan, kekuatan puncak, maupun perilaku setelah puncak. Maka berdasarkan studi ini, direkomendasikan penambahan perkuatan CFRP cukup dengan jarak antar lembaran 10cm.

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa perkuatan geser balok tinggi beton bertulangan menggunakan CFRP merupakan metode yang efektif untuk meningkatkan kapasitas beban, memperbaiki daktilitas, meningkatkan energi disipasi, dan memperbaiki perilaku pasca-puncak.

### Daftar Pustaka

- Abbood, I. S., Odaa, S. A., Hasan, K. F., & Jasim, M. A. (2021). Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures - A review. *Materials Today: Proceedings*, 43, 1003–1008. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.636>
- ACI Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 308-19) and Commentary*. American Concrete Institute
- Akkaya, H. C., Aydemir, C., & Arslan, G. (2022). Investigation on shear behavior of reinforced concrete deep beams without shear reinforcement strengthened with fiber reinforced polymers. *Case Studies in Construction Materials*, 17 (August), e01392. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01392>
- Al-fakih, A., Hisbany, M., Hashim, M., Alyousef, R., Mutafi, A., Hussein, S., Sabah, A., & Tafsirojjaman, T. (2021). Cracking behavior of sea sand RC beam bonded externally with CFRP plate. *Structures*, 33(November 2020), 1578–1589. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.05.042>
- Anggarini, E., Hayati, F., & Setiawan, I. (2018). Pemodelan Balok Tinggi pada Beton Mutu Tinggi dengan Pengekangan Menggunakan Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Hingga 3D. *Konstruksia*, 9(2), 31–40.
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. SNI 2847:2019. Jakarta
- Badan Standarisasi Nasional. (2021). *Panduan Perancangan dan Pelaksanaan Sistem Lembaran Serat Berpolimer Terlekat Eksternal untuk Perkuatan Struktur Beton*. SNI 8971:2021. Jakarta
- Darma, E., Ninik P. (2019). Investigasi Keruntuhan Geser Balok Tinggi Beton Bertulang dan Beton Fiber dengan Metode Eksperimental, Metode Numerik dan Metode Strut and Tie. *Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil*, 7(2), 69-78.
- Hardjasaputra, H, dan Tumilar, S. (2002). *Model Penunjang dan Pengikat (Strut and Tie) pada Perancangan Struktur Beton*. Jakarta: Universitas Pelita Harapan.
- Huang, Q., Guo, Z. and Kuang, J.S. (2016). Designing Infilled Reinforced Concrete Frames with the “Strong Frame-Weak Infill” Principle. *Engineering Structures* 123 (2016), 341-353. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.05.024>
- Hillerborg, A. (1989). The theoretical basis of a method to determine the fracture energy  $G_f$  of concrete. *Materials and Structures*, 22(131), 69–77. <https://doi.org/10.1007/BF02472127>
- Juliafad, E. (2021). *Metode Elemen Hingga Non-Linear Studi Kasus: Beton Bertulang Pasca-Bakar dengan Perkuatan Carbon Fiber Strip*. Padang: UNP Press
- Kurniawan, R. (2000). *Analisis Nonlinear Pelat Beton Pada Pondasi elastis dengan Metode Elemen Hingga*. Thesis Magister: Institut Teknologi Bandung.
- Meena, A., Devi, K. S., & Sharma, A. S. (2021). Study on behaviour of deep beam strengthened with GFRP sheets. *Journal of Physics: Conference Series*, 2040(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2040/1/012021>
- Munir M., et. al. (2014). Analisa Balok Tinggi Beton Bertulang Dengan Menggunakan Metode Strut and Tie Model. *Jom FTEKNIK* 1(2), 1–15.
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. Wiley.
- Pranata, Y. A., & Suryoatmono, B. (2019). Pemodelan Numerik Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(1), 42–62. <https://doi.org/10.28932/jts.v6i1.1326>
- Sajdlová, T. (2020). *ATENA Program Documentation Part 4-9 ATENA Science-GiD Strengthening of concrete structures Step by step guide for modelling strengthening with ATENA and GiD* Written by.
- Sarhan, O. and Raslan, M. (2020). Study of the elastic stiffness factor of steel structures with different lateral load resisting system. *International Journal of Advanced Engineering, Sciences, and Applications* 1(2), 6-11. <https://doi.org/10.47346/ijaesa.v1i2.26>
- Tjong, W. F. (2021) *Pengantar Metode Elemen Hingga untuk Analisis Struktur*. Depok: PT. Rajagrafindo Persada.

- Thamrin, R., Tanjung, J., Aryanti, R., Nur, O.F., & Devinus, A. (2016). Shear strength of reinforced concrete T-beams without stirrups. *Journal of Engineering Science and Technology*, 11(4), 548-562.
- Zaborac, J., Choi, J., & Bayrak, O. (2020). Assessment of deep beams with inadequate web reinforcement using strut-and-tie models. *Engineering Structures*, 218 (March), 110832. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110832>