Vol. 7, No. 3, Agustus 2024: hlm 859-872

# ANALISIS PERFORMA BALOK T BETON BERTULANG DENGAN SERAT POLIMER MENGGUNAKAN APLIKASI MIDAS FEA NX

#### Timotius Alfanov<sup>1</sup> dan Sunarjo Leman<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta timotius.325200090@stu.untar.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta sunarjo@ft.untar.ac.id

Masuk: 29-12-2023, revisi: 12-01-2024, diterima untuk diterbitkan: 16-01-2024

#### **ABSTRACT**

Over time, the structural integrity of a building may experience a decline in its capacity, necessitating the need for structural retrofitting. One method of structural retrofitting that is often used and considered ideal is to use Hybrid Fiber Reinforced Polymer (FRP) due to its ease of use and the ability to amalgamate the favorable mechanical properties of two FRP materials. This research discusses the effect of HFRP sheet composition on the performance of the flexural capacity of reinforced concrete beams. The T-beam specimens have dimensions of 260 mm in height, 155 mm in breadth, 415 mm in flange width, 60 mm flange thickness, and a span length of 2000 mm. These T-beams underwent testing with symmetric two-point loading at simple supports, reinforced with 4Ø10 tensile reinforcement, 2Ø16 compression reinforcement, and stirrups of Ø10. Flexural strengthening was carried out using 3 different HFRP compositions so that 4 test specimens were obtained including a T beam without strengthening as a control. Analysis was conducted using the finite element method through the MIDAS FEA program. The results indicate that each additional layer of HFRP significantly enhances the flexural capacity of the reinforced concrete T-beams by 97,22-145,03%. Finite element method analysis closely aligns with laboratory test results, with a maximum difference of ±9% indicating that the finite element method provides a conservative approach for predicting laboratory test results.

Keywords: HFRP; reinforced concrete; T beam; flexural capacity; MIDAS FEA

#### **ABSTRAK**

Seiring berjalannya waktu, struktur dapat mengalami penurunan kapasitas struktural sehingga perkuatan struktur perlu dilakukan. Salah satu metode perkuatan struktur yang sering dipakai dan dianggap ideal adalah dengan menggunakan *Hybrid Fiber Reinforced Polymer* (FRP) karena mudah dalam pengaplikasiannya dan dapat memadukan sifat mekanik yang baik dari dua bahan FRP yang digunakan. Penelitian ini membahas pengaruh komposisi lembaran HFRP terhadap kinerja kapasitas lentur balok beton bertulang. Sampel balok T mempunyai tinggi 260 mm, lebar badan 155 mm, lebar sayap 415 mm, tebal sayap 60 mm, dan panjang bentang 2000 mm. Balok T diuji tersebut diuji dengan pembebanan dua titik simetris pada tumpuan sederhana dengan tulangan tarik 4Ø10, tulangan tekan 2Ø16, dan sengkang Ø10. Perkuatan lentur dilakukan dengan menggunakan 3 komposisi HFRP yang berbeda sehingga diperoleh 4 benda uji termasuk balok T tanpa perkuatan sebagai kontrol. Analisis dilakukan dengan metode elemen hingga menggunakan program MIDAS FEA dan menunjukkan bahwa setiap penambahan lapisan pelat HFRP meningkatkan kapasitas lentur balok T beton bertulang sebesar 97,22-145,03%. Hasil analisis metode elemen hingga mendekati hasil uji laboratorium dengan perbedaan terbesar ±9% yang menandakan bahwa metode elemen hingga memberikan pendekatan konservatif untuk memprediksi hasil uji laboratorium.

Kata kunci: HFRP; beton bertulang, balok T; kapasitas lentur; MIDAS FEA

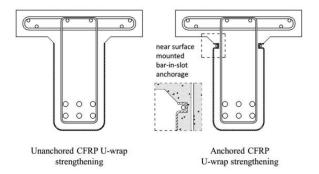
## 1. PENDAHULUAN

#### **Latar Belakang**

Salah satu bahan bangunan yang populer dan sering digunakan dalam konstruksi adalah beton. Salah satu kegunaannya adalah sebagai material beton bertulang. Pada dasarnya, beton bertulang merupakan kombinasi dari semen, agregat, dan air, yang diperkuat dengan tulangan baja. Kombinasi ini dapat membuat suatu elemen struktur menjadi tahan terhadap gaya tekan dan tarik, dimana beton akan memikul gaya tekan dan tulangan baja akan memikul gaya tarik. Salah satu elemen struktur yang menggunakan kombinasi ini adalah balok. Balok berfungsi sebagai penyalur beban dari pelat ke kolom. Oleh karena itu, beton bertulang menjadi pilihan yang sangat baik bagi elemen struktur balok. Namun, seiring berjalannya waktu, balok beton bertulang dapat mengalami penurunan kapasitas

struktural yang disebabkan oleh berbagai faktor, seperti perubahan kondisi lingkungan, beban yang meningkat, dan lain sebagainya (Luastika et al., 2019). Untuk mengatasi hal tersebut, diperlukan tindakan perkuatan pada balok beton bertulang supaya tidak terjadi kegagalan struktural.

Salah satu metode perkuatan yang cukup sering dipakai adalah dengan menggunakan *Fiber-Reinforced Polymer* (FRP). Metode perkuatan ini dianggap ideal karena material FRP tersebut merupakan material yang tahan terhadap korosi, memiliki kuat tarik yang tinggi, dan pemasangannya yang mudah. Namun di sisi lain, material FRP ini akan meningkatkan kekakuan dari struktur yang diperkuat yang menandakan bahwa daktilitas struktur menjadi berkurang (Rabinovitch & Frostig, 2003). Ini merupakan salah satu hal yang sangat dipehatikan pada perkuatan struktur dengan FRP. Penelitian yang dilakukan sebelumnya oleh Foster et al. (2017) meneliti mengenai balok T yang diperkuat dengan material FRP berbahan carbon (CFRP atau *Carbon Fiber-Reinforced Polymer*) seperti Gambar 1. Benda uji tersebut ditinjau terhadap perilaku gesernya. Hasilnya menunjukan bahwa balok T yang diperkuat dengan CFRP mengalami peningkatan dalam kapasitas geser hingga 86% dan kekakuannya.

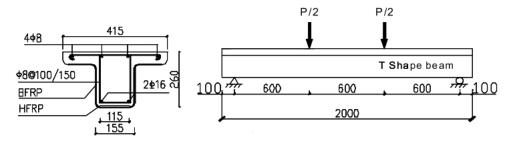


Gambar 1. Perkuatan dengan CFRP pada Balok T (Foster et al., 2017)

Riset terkait material FRP terus berkembang seiring berjalannya waktu. Salah satu material FRP yang sering dipakai selain carbon adalah glass (GFRP atau *Glass Fiber-Reinforced Polymer*). GFRP memiliki keuntungan dibandingkan dengan CFRP, yaitu harganya yang lebih murah dan beratnya yang lebih ringan. Penelitian yang dilakukan oleh Meikandaan & Murthy (2017) meneliti mengenai balok beton yang diperkuat dengan material GFRP. GFRP tersebut dilapisi pada bagian bawah beton. Hasil penelitian menunjukan bahwa beban ultimit yang dapat ditahan oleh balok yang diperkuat meningkat 14%. Perilaku yang ditunjukan oleh balok yang diperkuat GFRP tidak jauh berbeda dengan balok yang diperkuat CFRP, dimana dengan kehadiran material FRP tersebut, retak yang terjadi (pada penelitian ini adalah retak akibat lentur) dapat tertunda (terjadi pada beban yang lebih besar dibandingkan balok yang tidak diperkuat) dan formasi retak tidak terjadi secara tiba-tiba. Ini menunjukan bahwa GFRP layak untuk bisa digunakan sebagai perkuatan bagi struktur beton.

Akan tetapi, GFRP memiliki kekurangan, yaitu modulus elastis dan kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan dengan CFRP. Oleh karena itu, penelitian yang dilakukan oleh (Attari et al., 2012) membandingkan material gabungan FRP dari 2 bahan berbeda yang dikenal dengan nama HFRP (*Hybrid Fiber-Reinforced Polymer*). Penggabungan antara 2 material FRP yang berbeda (CFRP dan GFRP) dimaksudkan untuk mendapat material FRP yang memiliki daktilitas yang tinggi (didapat dari GFRP) dan kekuatan yang tinggi (didapat dari CFRP). Salah satu kesimpulan yang didapat berkaitan dengan penggunaan HFRP tersebut adalah balok yang diuji masih memiliki elongasi yang baik sebelum runtuh.

Selain 2 material FRP yang sudah dijelaskan sebelumnya, terdapat 1 material FRP yang belum banyak diketahui oleh banyak orang, yaitu BFRP (*Basalt Fiber-Reinforced Polymer*). Akhir-akhir ini, BFRP menjadi populer karena harganya yang lebih murah dibandingkan dengan GFRP yang sudah lebih murah dari CFRP. Selain itu, BFRP merupakan material yang ramah lingkungan dan tidak berbahaya karena material BFRP terbuat langsung dari batuan gunung berapi tanpa zat adiktif (Wang et al., 2017). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Zhang et al. (2017), BFRP merupakan material yang memiliki daktilitas yang lebih baik dibandingkan dengan CFRP dan memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan GFRP. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, diuji balok T dengan menggunakan HFRP yang terbuat dari CFRP dan BFRP. Model pengujian dapat dilihat pada Gambar 2. Hasil pengujian balok yang diperkuat dengan HFRP tersebut menunjukan bahwa regangan ultimit dari lembaran HFRP lebih besar 15% dibandingkan dengan CFRP. Selain itu, ditemukan bahwa balok yang diperkuat dengan HFRP tersebut memiliki kekakuan pasca leleh. Ini menunjukan bahwa balok akan memiliki daktilitas yang baik, dimana balok mampu memiliki deformasi yang besar sebelum mengalami keruntuhan.

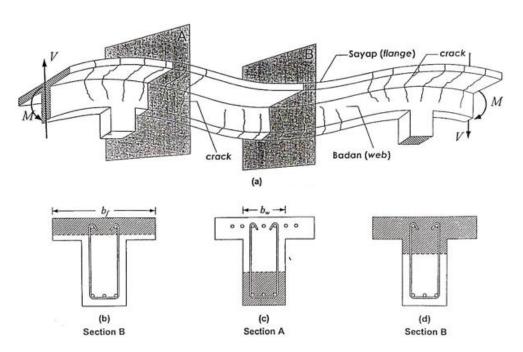


Gambar 2. Skema pengujian balok T yang diperkuat HFRP (Zhang et al., 2017)

Dari latar belakang tersebut, maka penelitian ini akan menganalisis pengaruh penggunaan lembaran HFRP terhadap peningkatan kapasitas lentur balok T beton bertulang yang dibandingkan dengan balok T beton bertulang konvensional menggunakan metode elemen hingga pada aplikasi Midas FEA NX. Model benda uji yang didapat dari referensi jurnal pengujian laboratorium akan dijadikan sebagai acuan model dengan dengan modifikasi dan batasan masalah yang ditentukan. Jadi, FRP yang digunakan adalah jenis *Carbon* FRP dan *Basalt* FRP. Pengaruh pemasangan FRP tersebut tidak diperhitungkan terhadap kapasitas gesernya. Hubungan antara balok dan FRP dimodelkan elastis sempurna, dimaksudkan supaya tidak terjadi *debonding* antara balok dan FRP sesuai dengan hasil uji laboratorium. Pengujian balok dilakukan di atas dua tumpuan sederhada dengan metode *four-point bending*. Pembebanan dilakukan secara statik nonlinear. Untuk material, mutu beton digunakan 45,6 MPa sesuai dengan hasil pengujian Zhang et al. (2017). Mutu baja tulangan dan FRP sesuai dengan hasil Zhang et al. (2017).

# **Balok T beton bertulang**

Beton bertulang adalah suatu jenis material konstruksi yang terdiri dari beton dan tulangan baja yang ditempatkan di dalamnya. Konsep ini digunakan dalam konstruksi bangunan untuk menggabungkan kekuatan dan keunggulan dari kedua material tersebut. Pada dasarnya, beton merupakan material yang kuat dalam menahan tekan, tetapi lemah dalam menahan tarik. Oleh karena itu, jika beban yang dipikul beton menimbulkan tegangan tarik yang melebihi kuat tarik material, maka dapat terjadi retakan pada beton. Jadi, dapat dikatakan bahwa untuk mengatasi kelemahan kuat tarik beton, maka ditambahkan tulangan baja yang mampu menahan tegangan-tegangan pada penampang balok beton yang dapat menerima tegangan tarik apabila balok tersebut dibebani. Dengan seperti itu, struktur dapat dirancang untuk menahan berbagai beban, baik beban tekan maupun tarik, serta mengatasi retakan dan deformasi yang mungkin terjadi (Imran & Zulkifli, 2019).

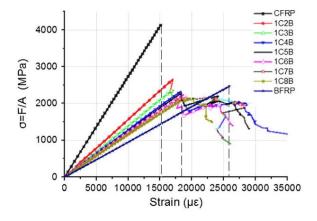


Gambar 3. Perilaku balok "T" (a) mengalami defleksi, (b) daerah tekan persegi akibat momen positif, (c) daerah tekan persegi akibat momen negatif, (d) zona tekan "T" akibat momen positif (Imran & Zulkifli, 2019)

Pada saat konstruksi, pengecoran balok dan pelat biasanya dilakukan secara bersamaan sehingga menghasilkan pengecoran yang monolit. Dalam kondisi ini, pelat beton akan berperan sebagai sayap atas balok. Balok seperti ini disebut sebagai balok T. Pada dasarnya, balok berperilaku seperti balok "T" pada saat menahan momen positif (sayap balok mengalami kompresi) dan berperilaku sebagai balok persegi biasa (sayap balok tertarik) ketika menahan momen negatif. Umumnya, zona kompresi balok "T" berbentuk persegi, seperti pada Gambar 3(b). Dalam kasus seperti itu, balok "T" tersebut dapat dianalisis sama seperti balok persegi dengan lebar penampang yang tertekan sama dengan lebar sayap (b<sub>f</sub>). Jika zona kompresi berbentuk "T" seperti pada Gambar 3(c), analisis dapat dilakukan secara terpisah dengan adanya kontribusi sayap dan badan penampang terhadap tahanan momen (Imran & Zulkifli, 2019).

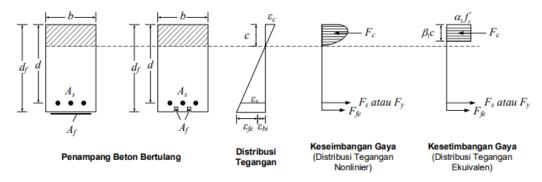
### Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah bahan penguat dan perbaikan struktural yang banyak digunakan dalam struktur bangunan serta jenis konstruksi lainnya, seperti jembatan. FRP merupakan salah satu material komposit yang terdiri dari dua unsur, yaitu serat dan matriks (Widyaningsih et al., 2016). Perilaku tarik dari material FRP dapat digambarkan sebagai hubungan tegangan dan regangan yang linear elastis. Material FRP merupakan material yang memiliki sifat getas. Ini ditunjukan dengan tidak adanya perilaku plastis seperti yang terlihat pada Gambar 4. Kekuatan tarik dari material FRP tergantung dari beberapa faktor, yaitu jenis serat, orientasi serat, dan metode produksi serat. Sementara itu, untuk perilaku tekan, modulus elastisitas tekan bahan FRP biasanya lebih kecil dari modulus elastisitas tariknya. FRP bisa mengalami kegagalan apabila diberikan gaya tekan longitudinal, seperti runtuh tarik transversal, patah mikro pada serat, dan runtuh geser. Oleh karena itu, perkuatan FRP pada balok biasanya digunakan pada daerah yang mengalami tarik (Zhang et al., 2017).



Gambar 4. Grafik hubungan tegangan regangan FRP kondisi tarik (Zhang et al., 2017)

## Kuat nominal balok beton bertulang dengan FRP



Gambar 5. Regangan internal dan distribusi tegangan penampang pada kondisi ultimate (SNI 8972:2021)

Berdasarkan SNI 8972:2021, kuat lentur nominal beton bertulang dengan perkuatan FRP dapat dihitung berdasarkan kompatibilitas regangan, keseimbangan gaya dalam, dan juga mode kegagalan yang menentukan. Momen nominal berdasarkan Gambar 5 didapat dengan memperhitungkan kontribusi tulangan baja dan kontribusi FRP yang dapat diperoleh dari Persamaan 1 dan Persamaan 2.

$$M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \tag{1}$$

$$M_{nf} = A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \tag{2}$$

dengan  $M_{ns}$  = kontribusi momen nominal dari tulangan baja (Nmm),  $A_s$  = luas tulangan (mm²),  $f_s$  = tegangan tulangan (N/mm²), d = tinggi efektif balok (mm),  $\beta_1$  = faktor pembentuk tegangan beton tekan persegi, c = letak garis netral dari serat atas balok,  $M_{nf}$  = kontribusi momen nominal dari FRP (Nmm),  $A_f$  = luas lapisan FRP (mm²),  $f_{fe}$  = tegangan FRP (N/mm²), dan  $d_f$  = jarak dari serat atas beton ke lapisan FRP (mm). Dengan demikian, nilai momen nominal dan beban maksimum dapat ditentukan dengan Persamaan 3 dan Persamaan 4.

$$M_n = M_{ns} + M_{ns} \tag{3}$$

$$P = \frac{M_n}{a/2} \tag{4}$$

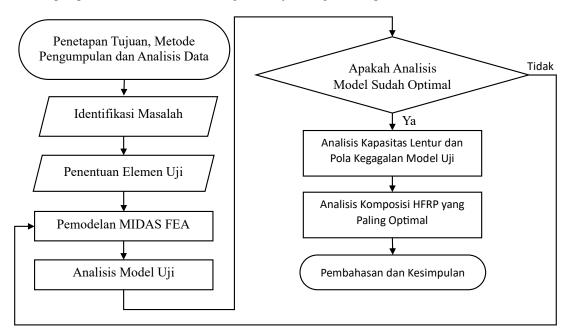
dengan  $M_n$  = momen nominal (Nmm), P = kapasitas beban maksimum (N), dan a = jarak antara beban yang diletakan dan perletakan (m).

#### Metode elemen hingga

Metode elemen hingga adalah metode numerik untuk menyelesaikan masalah mekanis kontinu dengan akurasi yang dapat diterima oleh para insinyur. Menentukan solusi analitis untuk masalah geometri, beban, dan sifat material yang kompleks sangatlah sulit. Oleh karena itu, diperlukan solusi numerik dan solusi yang dapat digunakan adalah metode elemen hingga. Pada dasarnya, metode elemen hingga menyelesaikan persoalan dengan cara membagi sebuah struktur menjadi bagian-bagian yang lebih kecil yang disebut elemen sehingga solusi dalam setiap bagian yang lebih kecil dapat dinyatakan dengan fungsi yang jauh lebih sederhana daripada keseluruhan. Bagian-bagian kecil tersebut secara matematis terhubung satu sama lain sehingga terjadi kesesuaian dan konsistensi antar bagian atau elemen kecil tersebut. Selain itu, syarat-syarat batas yang ada juga terpenuhi. Secara singkat, solusi untuk permasalahan struktural biasanya didapatkan dengan menentukan perpindahan tiap nodal dan tegangan tiap elemen dalam suatu struktur yang diberikan beban (Logan, 2012).

## 2. METODE PENELITIAN

Acuan untuk penelitian ini adalah jurnal berdasarkan Zhang et al. (2017). Model pengujian dan data material dalam jurnal tersebut dijadikan sebagai acuan dengan memodifikasi elemen model analisis yang disertai dengan batasan penelitian. Tahapan penelitian secara umum diringkas menjadi diagram alir pada Gambar 6.

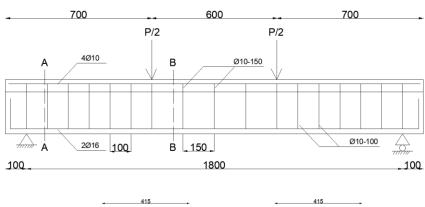


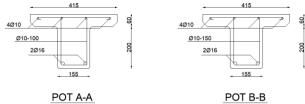
Gambar 6. Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini, terdapat 4 model uji. Untuk model uji pertama, diberi kode BK dengan pengertian balok kontrol. Ini akan dijadikan acuan sebagai penambahan kapasitas dari model uji yang lain. Selanjutnya adalah 3 model uji dengan kode BT-nomor. Pemberian kode BT untuk menandakan bahwa balok T beton bertulang dibungkus FRP mulai dari bagian bawah balok, samping balok, hingga sayap balok (*T-wrapping*). Sementara itu, untuk nomor 1, 2, dan 3 menandakan perbedaan komposisi lapisan HFRP. Model benda uji dan skema pengujian dapat dilihat pada Tabel 1, Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9. Berkaitan dengan pemodelan material, untuk balok T beton bertulang digunakan material *isotropic-concrete smeared crack*. Sementara itu, untuk tulangan dan FRP, digunakan material *isotropic-von mises*.

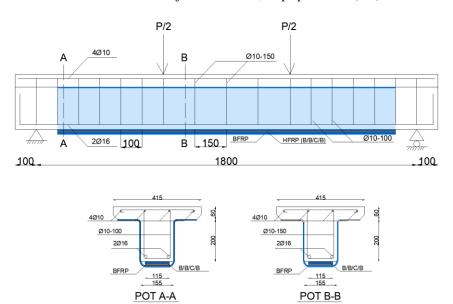
Tabel 1. Tabel Model Uji

No	Kode	Jumlah Lapisan HFRP	Komposisi HFRP
1	BK	-	-
8	BT-1	1C3B	B/B/C/B
9	BT-2	1C4B	B/B/C/B/B
10	BT-3	1C5B	B/B/C/B/B/B

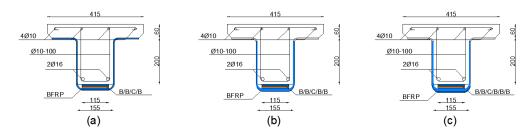




Gambar 7. Model uji balok kontrol, tanpa perkuatan (BK)



Gambar 8. Model Uji BT-1

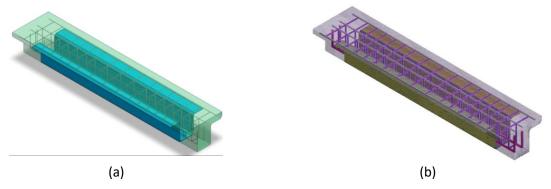


Gambar 9. Model uji (a) BT-1, (b) BT-2, (c) BT-3

#### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Pemodelan

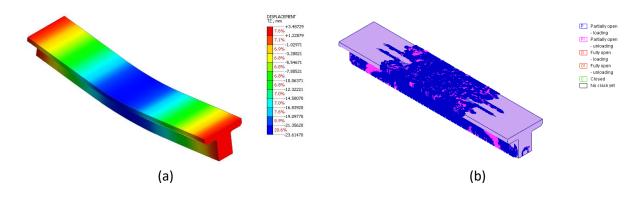
Untuk geometri balok T dan FRP dimodelkan sebagai elemen padat (*solid*), sedangkan geometri tulangan dimodelkan sebagai elemen garis (*curve*). Contoh pemodelan geometri dapat dilihat pada Gambar 10 (a). Ukuran diskretisasi (*meshing*) yang digunakan adalah sebesar 10 mm. Untuk balok T dan FRP, properti yang digunakan bersifat *solid* sesuai dengan geometrinya sehingga nantinya di-*mesh* secara 3D. Sementara itu, untuk tulangan, digunakan properti *embedded truss*. Untuk *interface*, digunakan tipe *plane interface* dan dibuat pada *interface* antara HFRP & beton, HFRP & BFRP, dan BFRP & beton. Untuk geometri yang sudah di-*mesh*, dapat dilihat pada Gambar 10 (b). Pembebanan berupa perpindahan (*displacement*) sebesar nilai *displacement* maksimum yang didapat dari jurnal referensi dan dimasukan searah sumbu z dengan nilai negatif yang menunjukan arah ke bawah. Selanjutnya, analisis dilakukan secara statik nonlinear. Hasil dari analisis dengan metode elemen hingga akan dibandingkan dengan hasil uji laboratorium dan hasil perhitungan teoritis.

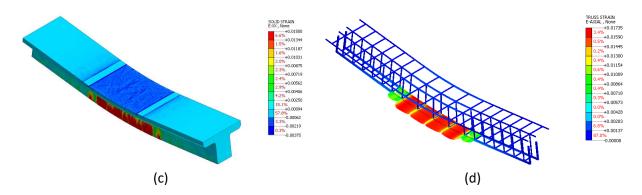


Gambar 10. Pemodelan model uji BT-1 (a) geometri model uji, (b) setelah meshing

#### **Balok kontrol**

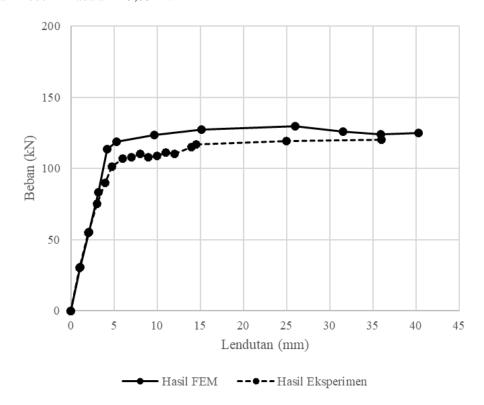
Hasil analisis MIDAS FEA menunjukkan hasil yang mendekati dengan hasil uji laboratorium dan perhitungan manual seperti yang terlihat pada Tabel 2 dan Tabel 3. Pola retak menunjukkan kondisi retak lentur disertai retak geser lentur. Kegagalan pada balok kontrol diawali dengan melelehnya tulangan longitudinal bawah di mana nilai regangan melebihi 0,00198 dan diikuti oleh hancurnya beton pada bagian bawah balok. Lendutan, pola retak, regangan beton, dan regangan tulangan dapat dilihat pada Gambar 11.





Gambar 11. Hasil analisis metode elemen hingga model uji BK pada kondisi *ultimate* (a) lendutan, (b) pola retak, (c) regangan balok, (d) regangan tulangan

Selanjutnya, hasil beban dan lendutan yang ada pada setiap *increment* diplot dalam grafik beban terhadap lendutan sehingga didapatkan grafik seperti Gambar 12. Dari grafik tersebut, dapat dilihat bahwa kapasitas lentur berupa beban maksimum dari model BK adalah 129,68 kN.



Gambar 12. Perbandingan grafik beban terhadap lendutan model uji BK antara hasil FEM dan eksperimen

Tabel 2. Kapasitas Lentur Model Uji BK

Model	P <sub>maks</sub> FEM (kN)	P <sub>maks</sub> Teoritis (kN)	P <sub>maks</sub> Eksperimen (kN)
BK	129,68	123,53	120,30

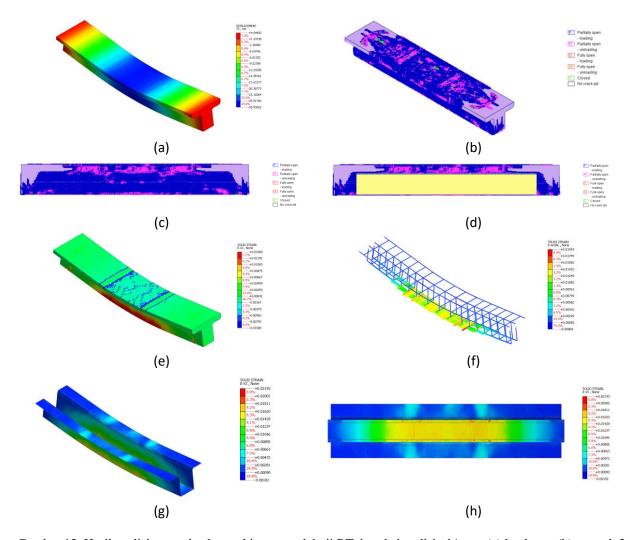
Tabel 3. Persentase Perbedaan Hasil Analisis Model Uji BK

Model	FEM vs Teoritis	FEM vs Eksperimen
BK	4,74%	7,80%

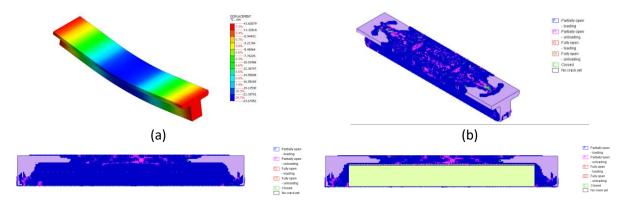
## Model uji BT

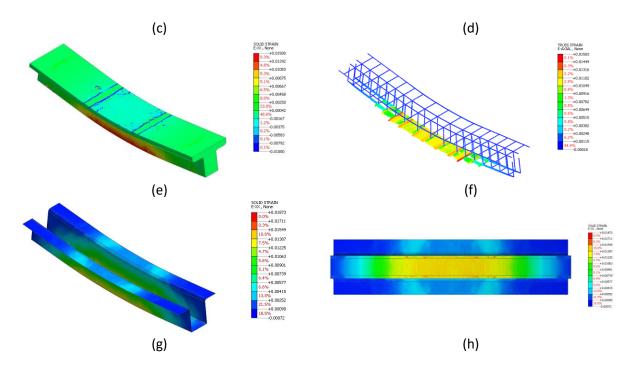
Pola retak yang terjadi pada semua model uji BT adalah retak lentur yang diikuti retak geser lentur. Sementara itu, untuk keadaan material pada kondisi ultimate, didapatkan bahwa regangan tekan balok sudah mencapai regangan

maksimumnya, yaitu sebesar 0,003. Begitu juga yang terjadi pada HFRP, dimana regangannya telah mencapai nilai maksimum, yaitu sebesar 0,0175 untuk model BT-1, 0,0180 untuk model BT-2, dan 0,0185 untuk model BT-3. Namun, untuk BFRP, regangannya belum mencapai nilai maksimum. Kemudian, untuk tulangan dari balok tersebut, hanya tulangan longitudinal bawah yang telah mengalami leleh. Untuk keruntuhan model ini, diawali dengan retak pada bagian bawah balok. Namun, FRP yang ada berperan sebagai *confinement* tambahan bagi balok sehingga retak tersebut merambat ke bagian atas balok dan akhirnya terjadi keruntuhan yang disebabkan oleh hancurnya beton pada bagian atas balok. Lendutan, pola retak, regangan beton, dan regangan FRP dari model uji BT-1, BT-2, dan BT-3 dapat dilihat pada Gambar 13, Gambar 14, dan Gambar 15.

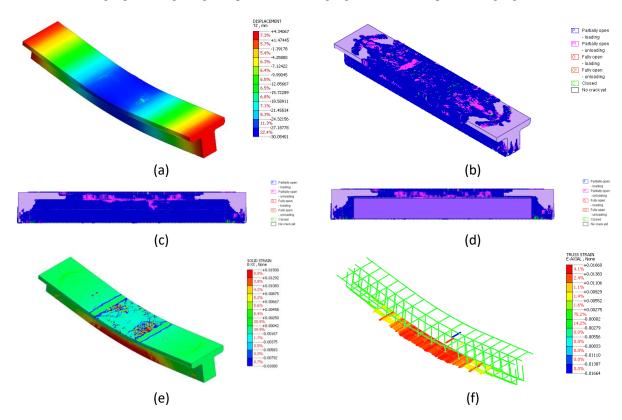


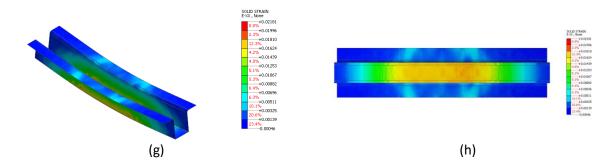
Gambar 13. Hasil analisis metode elemen hingga model uji BT-1 pada kondisi *ultimate* (a) lendutan, (b) tampak 3 dimensi pola retak balok, (c) tampak depan pola retak balok, (d) tampak depan pola retak, (e) regangan balok, (f) regangan tulangan, (g) tampak 3 dimensi regangan FRP, (h) tampak atas regangan FRP





Gambar 14. Hasil analisis metode elemen hingga model uji BT-2 pada kondisi *ultimate* (a) lendutan, (b) tampak 3 dimensi pola retak balok, (c) tampak depan pola retak balok, (d) tampak depan pola retak, (e) regangan balok, (f) regangan tulangan, (g) tampak 3 dimensi regangan FRP, (h) tampak atas regangan FRP



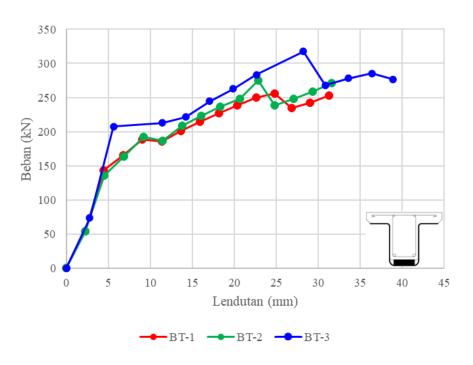


Gambar 15. Hasil analisis metode elemen hingga model uji BT-3 pada kondisi *ultimate* (a) lendutan, (b) tampak 3 dimensi pola retak balok, (c) tampak depan pola retak balok, (d) tampak depan pola retak, (e) regangan balok, (f) regangan tulangan, (g) tampak 3 dimensi regangan FRP, (h) tampak atas regangan FRP

Dari 3 model tersebut, didapati bahwa model uji BT-3, dimana lapisan HFRP-nya merupakan yang paling tebal diantara yang lain, memberikan kinerja terbaik dalam menaikan kapasitas lentur. Seperti terlihat pada Tabel 4 dan Gambar 16, BT-3 dapat menaikan kapasitas lentur menjadi 317,75 kN dengan persentase kenaikan sebesar 145,03%. Setelah itu, diikuti dengan BT-2 dan model uji dengan kenaikan kapasitas lentur terkecil adalah BT-1.

	Beban	Momen	Kenaikan
Model	Maksimum	Maksimum	Kapasitas
	(kN)	(kNm)	Lentur
BK	129,68	38,90	Acuan
BT-1	255,76	76,73	97,22%
BT-2	275,34	82,60	112,32%
BT-3	317.75	95 32	145 03%

Tabel 4. Persentase Kenaikan Kapasitas Lentur



Gambar 16. Grafik beban terhadap lendutan model uji BT

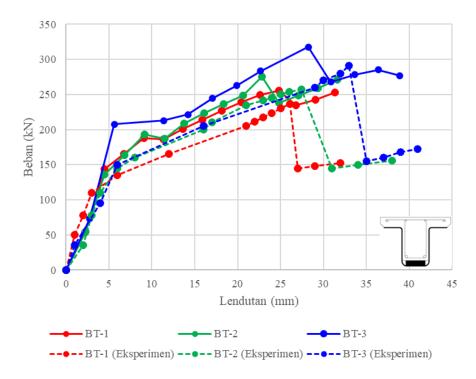
Ketika hasil metode elemen hingga tersebut dibandingkan hasil uji laboratorium, didapati bahwa grafik dan hasil yang didapat cukup mirip dengan persentase perbedaan terbesar adalah 9,34% untuk perbandingan antara hasil FEM & hasil uji laboratorium. Tabel dan grafik perbandingan dapat dilihat pada Tabel 5, Tabel 6, dan Gambar 17.

Tabel 5. Kapasitas Lentur Model Uji BT

Model	P <sub>maks</sub> FEM (kN)	P <sub>maks</sub> Teoritis (kN)	P <sub>maks</sub> Eksperimen (kN)
BT-1	255,76	247,13	235,60
BT-2	275,34	252,07	257,00
BT-3	317,75	256,71	290,60

Tabel 6. Persentase Perbedaan Hasil Analisis Model Uji BT

Model	FEM vs	FEM vs
Model	Teoritis	Eksperimen
BT-1	3,37%	8,56%
BT-2	8,45%	7,13%
BT-3	19,21%	9,34%



Gambar 17. Perbandingan grafik beban terhadap lendutan model uji BT antara hasil FEM dan Eksperimen

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

- 1. Penggunaan HFRP pada balok T beton bertulang terbukti mampu meningkatkan kapasitas lentur berupa kapasitas beban maksimum dan momen maksimum dari balok T beton bertulang.
- 2. Model uji dengan lapisan HFRP paling tebal (BT-3) memberikan kenaikan kapasitas lentur yang terbesar, yaitu 145,03%.
- 3. Analisis dengan metode elemen hingga memberikan pendekatan yang cukup baik dalam memprediksi hasil uji laboratorium.

## **DAFTAR PUSTAKA**

Attari, N., Amziane, S., & Chemrouk, M. (2012). Flexural Strengthening of Concrete Beams Using CFRP, GFRP, and hybrid FRP Sheets. *Construction and Building Materials*, *37*, 746-757. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.052

Badan Standardisasi Nasional. (2021). *Metode Uji Komposit Serat Berpolimer Sebagai Penulangan atau Perkuatan Struktur Beton dan Masonri (SNI 8972:2021)*. https://doi.org/http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList

- Foster, R. M., Brindley, M., Lees, J. M., Ibell, T. J., Morley, C. T., Darby, A. P., & Evernden, M. C. (2017). Experimental Investigation of Reinforced Concrete T-Beams Strengthened in Shear with Externally Bonded CFRP Sheets. *Journal of Composites for Construction*, 21(2), 04016086. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000743
- Imran, I., & Zulkifli, E. (2019). Perencanaan Dasar Struktur Beton Bertulang (2nd ed.). Bandung: ITB Press.
- Logan, D. L. (2012). A First Course in The Finite Element Method. Congage Learning.
- Luastika, G. N., Lingga, A. A., & Lestyowati, Y. (2019). Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang dengan Glass Fiber Reinforced Polymer. *Jurnal Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Tanjungpura*, 6(2), 1-7. https://doi.org/10.26418/jelast.v6i2.35569
- Meikandaan, T. P., & Murthy, A. R. (2017). Flexural Behaviour RC Beam Wrapped with GFRP Sheets. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(2), 452-469.
- Rabinovitch, O., & Frostig, Y. (2003). Experiments and Analytical Comparison of RC Beams Strengthened with CFRP Composites. *Composites: Part B, 34*(8), 663-677. https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00090-8
- Wang, Z., Zhao, X.-L., Xian, G., Wu, G., Singh Raman, R. K., Al-Saadi, S., & Haque, A. (2017). Long-term durability of Basalt- and Glass-Fibre Reinforced Polymer (BFRP/GFRP) Bars in Seawater and Sea Sand Concrete Environment. *Construction and Building Materials*, 139, 467-489. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.038
- Widyaningsih, E., Herbudiman, B., & Hardono, S. (2016). Kajian Eksperimental Kapasitas Sambungan Material Fiber Reinforced Polymer. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 2(3), 29-38. https://doi.org/10.26760/rekaracana.v2i3.29
- Zhang, P., Zhu, H., Wu, G., Meng, S., & Wu, Z. (2017). Flexural Performance of HFRP-RC Composite T-Beams with Different Interfaces. *Journal of Composites for Construction*, 21(3), 04016101. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000757

Alfanov dan Leman (2024)