

ANALISIS KAPASITAS TORSI BALOK L SPANDREL BETON BERTULANG TERHADAP VARIASI LEMBARAN SERAT KARBON

Davin Vincent Pratama¹ dan Sunarjo Leman^{1*}

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
sunarjo@ft.untar.ac.id

Masuk: 09-06-2025, revisi: 08-07-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-07-2025

ABSTRACT

Building structures often experience a decrease in capacity over time due to repeated loading, corrosion, or other environmental factors, which can reduce their performance in resisting loads, including torsional loads. Therefore, strengthening methods are needed, one of which is the use of carbon fiber reinforced polymer (CFRP), known for its high strength, light weight, and corrosion resistance. This study examines the effect of CFRP sheets on increasing the torsional capacity of reinforced concrete L-beams with a span length of 1500 mm, effective width of 400 mm, and height of 450 mm, reinforced using D10, D12, and D16 bars. The strengthening was carried out by attaching 150 mm wide CFRP sheets along the beam surface, with varied spacing to achieve maximum effectiveness, resulting in five test models. Numerical analysis was conducted using MIDAS FEA NX software based on the finite element method to assess how much CFRP reinforcement can enhance torsional capacity and how closely it aligns with laboratory test results, thereby providing a more accurate representation of structural performance after strengthening.

Keywords: CFRP; torsional capacity; L beam; MIDAS FEA NX; finite element method

ABSTRAK

Struktur bangunan sering mengalami penurunan kapasitas seiring waktu akibat beban berulang, korosi, atau faktor lingkungan lainnya, yang dapat menurunkan kinerja struktur dalam menahan beban, termasuk beban torsi. Oleh karena itu, diperlukan metode perkuatan, salah satunya dengan menggunakan *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) yang dikenal memiliki kekuatan tinggi, ringan, dan tahan korosi. Penelitian ini membahas pengaruh penggunaan lembaran CFRP terhadap peningkatan kapasitas torsi balok L beton bertulang dengan spesifikasi panjang bentang 1500 mm, lebar efektif 400 mm, dan tinggi 450 mm, serta penulangan menggunakan D10, D12, dan D16. Perkuatan dilakukan dengan memasang lembaran CFRP selebar 150 mm pada permukaan balok, dengan variasi jarak antar lembaran untuk memperoleh efektivitas maksimum, menghasilkan lima model uji. Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak MIDAS FEA NX berbasis metode elemen hingga untuk mengevaluasi sejauh mana penguatan CFRP mampu meningkatkan kapasitas torsi dan mendekati hasil uji laboratorium, sehingga dapat memberikan gambaran yang lebih akurat terhadap kinerja struktur setelah diperkuat.

Kata kunci: CFRP; kapasitas torsi; balok L; MIDAS FEA NX; metode elemen hingga

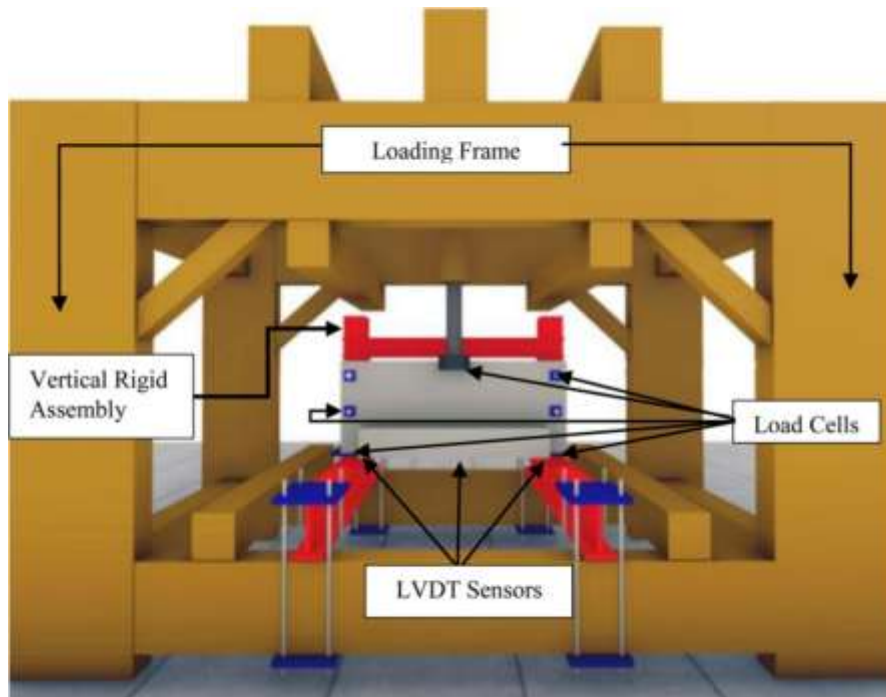
1. PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan material komposit yang terdiri dari dua material yaitu baja dan beton, material ini merupakan salah satu jenis beton yang sering digunakan untuk mengatasi kekurangan beton dalam menahan tarikan. Beton bertulang memiliki nilai redaman getar yang baik serta mudah dibentuk dalam cetakan, namun diperlukan waktu yang lama untuk mencapai kekuatan yang diperlukan sehingga harus adanya pengawasan yang baik dalam setiap proses pembuatan material beton bertulang (Widjaya & Leman, 2024). Struktur beton sering kali mengalami kerusakan akibat berbagai macam alasan dan diperlukan peningkatan untuk memastikan bahwa beton layak digunakan (Babaeidarabad et al., 2014). Peningkatan yang saat ini banyak diterapkan dalam dunia konstruksi adalah *fiber reinforced polymer* (FRP). Penggabungan dua material antara beton dan FRP dapat disebut sebagai struktur komposit (Sebastian & Leman, 2024). FRP muncul sebagai alternatif untuk perkuatan beton bertulang dan telah diaplikasikan di berbagai elemen beton (Sandjaya et al., 2024).

Penggunaan FRP terbukti dapat meningkatkan kapasitas lentur sehingga balok beton bertulang memiliki kekuatan yang lebih baik dibandingkan tanpa adanya lembaran FRP (Michael & Leman, 2023). Jenis FRP yang paling umum digunakan adalah *carbon fiber-reinforced polymer* (CFRP), *glass fiber-reinforced polymer* (GFRP), dan *aramid fiber-reinforced polymer* (AFRP) (Khan et al., 2023). Diantara ketiga material FRP, CFRP memiliki harga yang lebih mahal dibandingkan kedua material lainnya, namun CFRP memiliki kekuatan yang sangat kuat serta kekakuannya yang

sangat baik dibandingkan kedua material lainnya (Alfanov & Leman, 2024). Riset mengenai CFRP saat ini telah banyak diteliti termasuk salah satunya oleh Purmawinata dan Leo (2020) yang meneliti tentang CFRP *plate* pada kapasitas lentur balok. Pada penelitian tersebut, didapatkan hasil bahwa dengan adanya penambahan CFRP *Plate* dapat menambahkan kekuatan lentur hingga 103,5% namun kekuatan lendutan balok akan menurun sebesar 68,9% sehingga diperlukannya pengujian dengan variasi tebal dan lebar yang lebih bervariasi agar mendapatkan hasil yang lebih baik.

Ayaad dan Oukaili (2023) berpendapat bahwa penguatan balok spandrel yang diberi beban dalam dua tahap masih jarang sehingga pengujian seperti Gambar 1 bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai efisiensi lembaran CFRP pada balok spandrel beton bertulang berbentuk L untuk meningkatkan perilaku torsi belok yang ujungnya diberi beban.



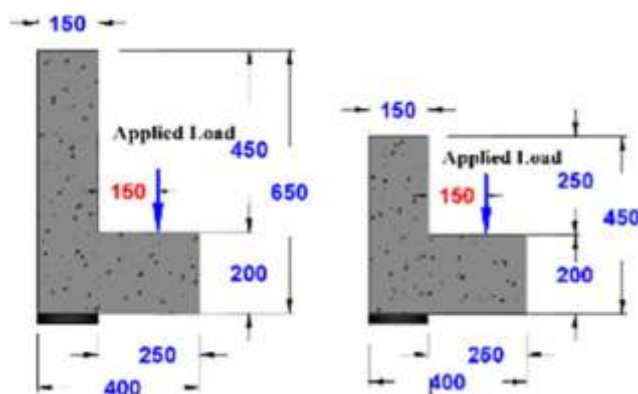
Gambar 1. Pengaturan pengujian (Ayaad & Oukaili, 2023)

Pada Gambar 2, Ayaad dan Oukaili (2023) membuat dua jenis ukuran balok yang digunakan yaitu $650 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ untuk balok ramping dan $450 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ untuk balok kompak, dengan dimensi sayap (*ledge*) $250 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$. Bentang balok yang diuji memiliki panjang 1500 mm dengan sayap dipotong sebesar 150 mm pada kedua ujung balok spandrel. Setiap sisi *web* diberi dua lubang untuk koneksi dengan rangka vertikal kaku menggunakan batang baut berulir berkekuatan tinggi. Pada Gambar 3, balok spandrel yang diperkuat dengan lembaran CFRP yang ditempelkan pada permukaan depan dan belakang web memiliki lebar 150 mm dan membungkus penampang balok serta didistribusikan sepanjang bentang balok. Sistem penguatan “*wet lay-up*” lembaran CFRP terdiri dari primer, lembaran CFRP, dan resin digunakan untuk perkuatan pada penelitian ini. Penelitian terhadap balok L spandrel beton bertulang akan diuji bagaimana kapasitas torsi balok L jika diberikan beban secara monotonik untuk mengetahui bagaimana kapasitas balok L tanpa diberi perkuatan CFRP dan dengan diberi perkuatan CFRP.

Balok L spandrel

Dalam lantai balok-pelat, balok ujung disebut balok spandrel. Jenis lantai ini memiliki bagian pelat pada satu sisi balok dan di cor secara monolitik dengan balok. Penampang balok spandrel tidak simetris di bawah beban vertikal (Hassoun & Al-Manaseer, 2020).

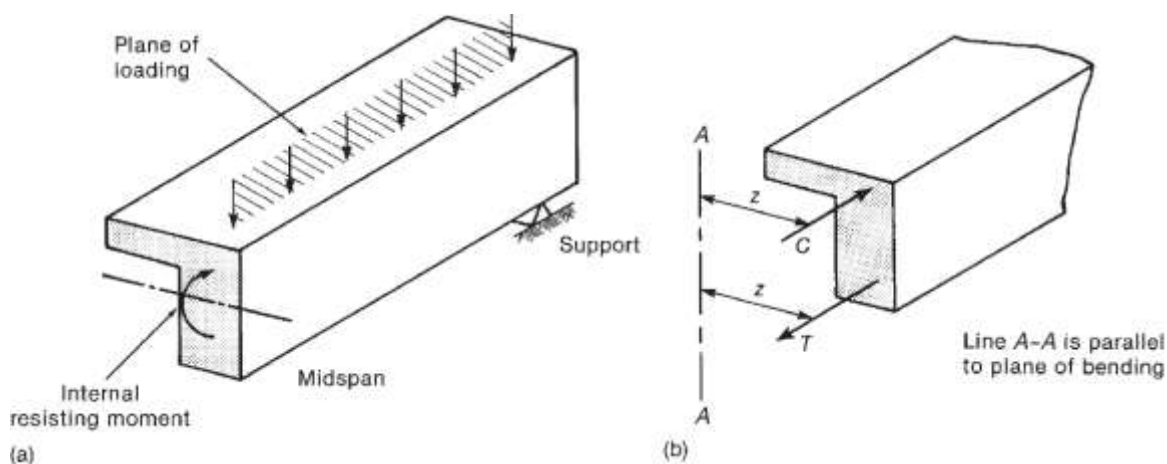
Dalam analisis balok spandrel, terlihat bahwa setengah bagian balok ditumpu oleh penampang melintang yang tidak simetris, dengan beban bekerja pada bidang tersebut. Bidang ini diasumsikan melewati pusat geser penampang, sehingga konfigurasi tersebut dapat menyebabkan terjadinya perpindahan vertikal dan lateral balok di antara tumpuan. Gaya beban yang bekerja akan menghasilkan momen lentur, yang harus dilawan oleh momen internal akibat gaya tarik dan tekan pada penampang terhadap sumbu horizontal, seperti ditunjukkan pada Gambar 4 (Wight & MacGregor, 2012).



Gambar 2. Dimensi Balok L Spandrel (Ayaad & Oukaili, 2023)



Gambar 3. Pengaplikasian lembaran CFRP pada balok spandrel berbentuk L (Ayaad & Oukaili, 2023)



Gambar 4. Pembebanan yang sering terjadi pada balok spandrel (Wight & MacGregor, 2012)

Fiber reinforced polymer (FRP)

FRP merupakan material komposit yang terbuat dari serat yang memiliki kekuatan tinggi dan matriks untuk mengikat serat – serat tersebut dalam membentuk struktur. Serat memberikan kekuatan dan kekakuan, sedangkan matriks (resin) mentransfer tegangan dan regangan antar serat FRP memiliki keuntungan dibandingkan material struktural lainnya seperti baja karena bobot ringan, ketahanan terhadap korosi, dan kemudahan aplikasi. FRP sangat cocok untuk perbaikan dan rehabilitasi struktur beton bertulang serta beton prategang (Balaguru et al., 2008). CFRP merupakan salah satu FRP yang sering digunakan dalam aplikasi rekayasa struktural saat ini khususnya pada lembaran FRP (Bank, 2006). CFRP menawarkan modulus tertinggi dibandingkan FRP lainnya serta memiliki kekatan tarik yang tinggi.

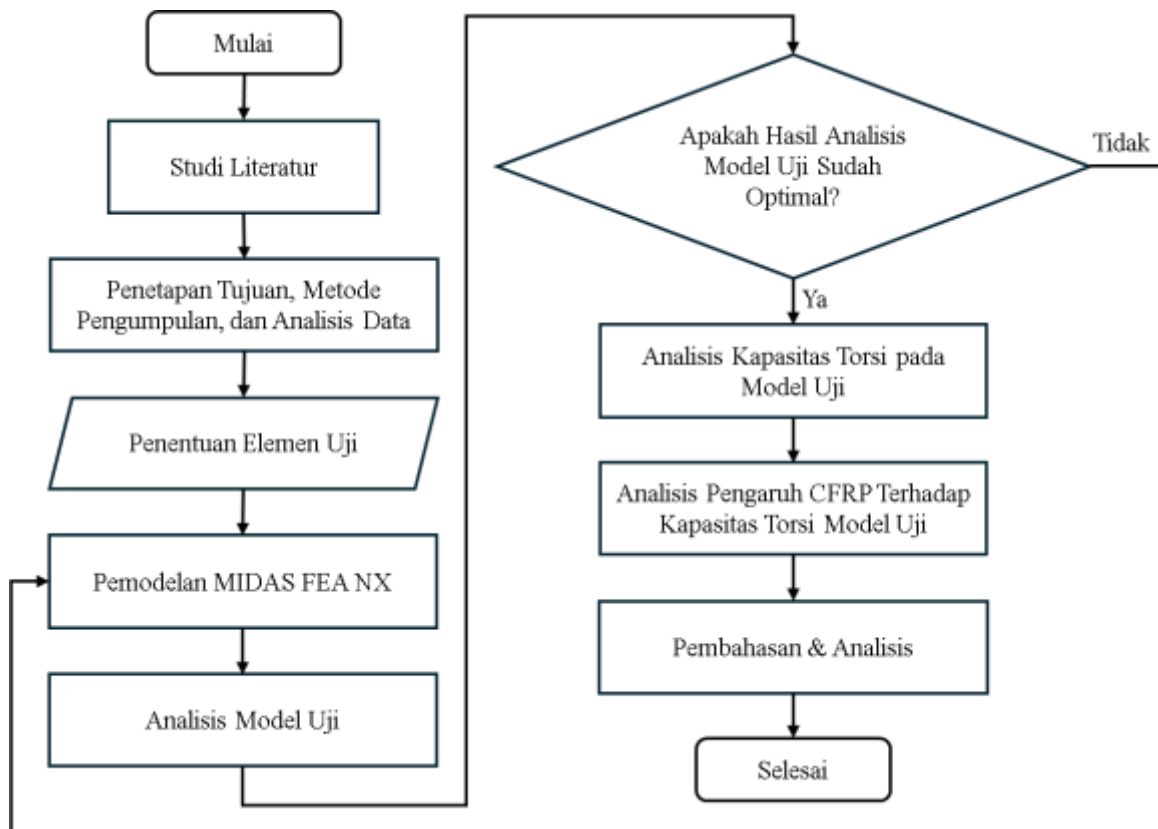
Metode elemen hingga

Metode elemen hingga atau *finite element method* adalah suatu prosedur untuk penyelesaian numerik dari persamaan yang mengatur perilaku fenomena alam. Perilaku alam dapat digambarkan dalam bentuk diferensial atau integral

sehingga metode elemen hingga dapat diartikan sebagai teknik numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial atau integral. Penggunaan metode elemen hingga pada suatu komponen dapat menghasilkan evolusi dalam ruang atau waktu dari satu atau lebih variabel komponen tersebut. Dalam analisis struktur, metode elemen hingga merupakan metode untuk menghitung perpindahan, tegangan, dan regangan dalam suatu struktur di bawah beban (Oñate, 2009).

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, akan dimodelkan balok L spandrel berdasarkan uji laboratorium yang dilakukan oleh (Ayaad & Oukaili, 2023). Model serta data-data yang digunakan sesuai dengan jurnal tersebut serta hasil yang diperoleh akan dibandingkan dengan analisis metode elemen hingga. Setelah itu, penelitian akan dikembangkan dengan berbagai macam variasi yang akan dimodelkan dan dianalisis lebih lanjut. Tahapan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 5.

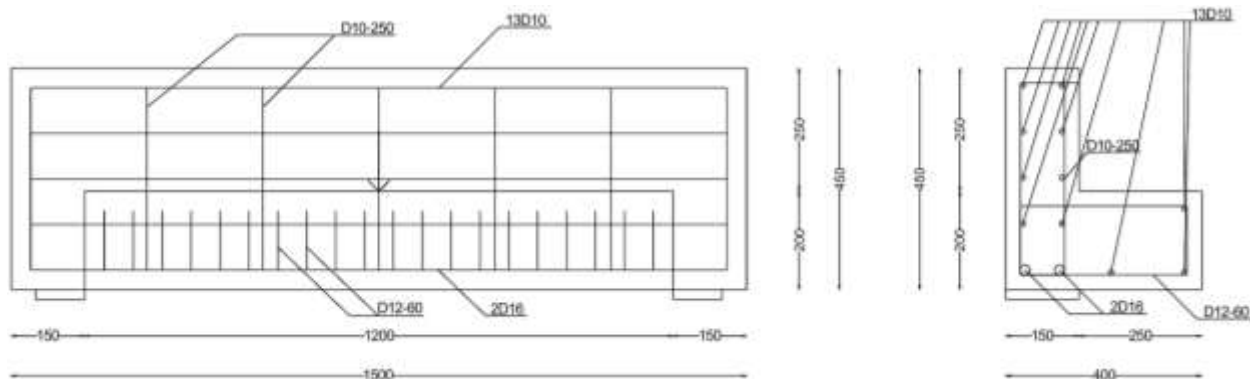


Gambar 5. Diagram alir penelitian

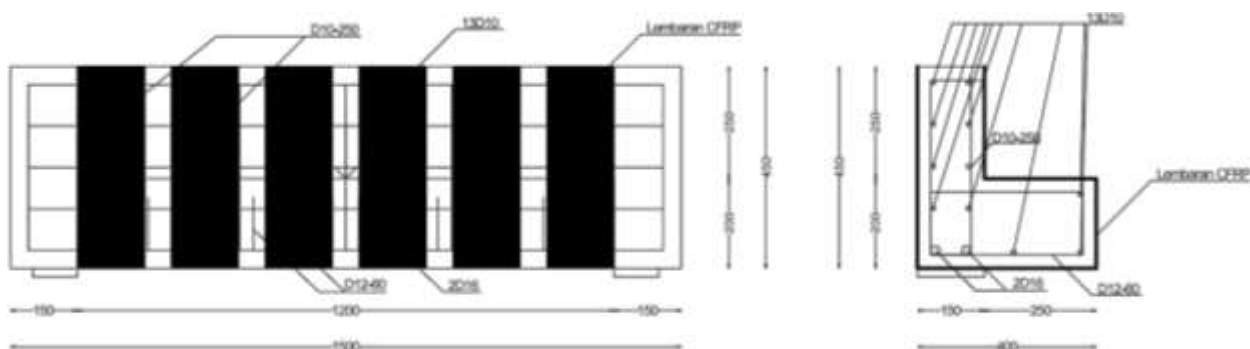
Terdapat 5 model yang akan diuji menggunakan metode elemen hingga yang terdiri dari balok beton bertulang tanpa perkuatan sebagai kontrol dan balok beton bertulang dengan perkuatan lembaran CFRP. Model yang akan diuji mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Ayaad et al. (2023), detail dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 6-8.

Tabel 1. Model uji balok L spandrel

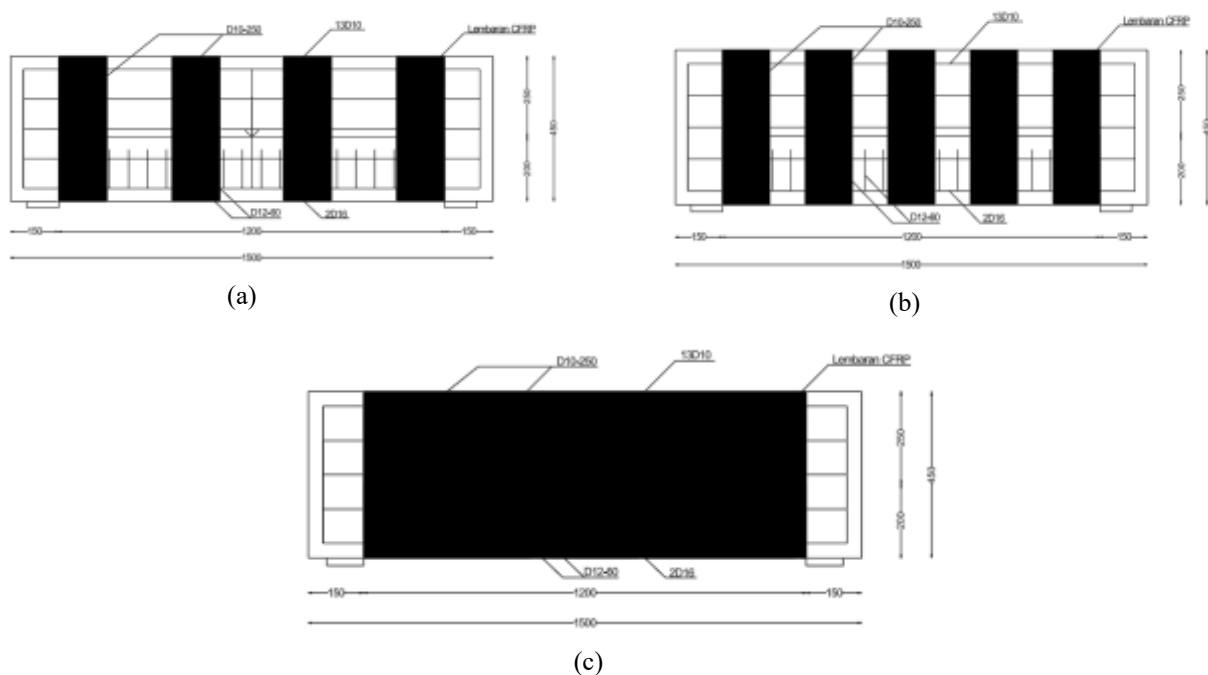
Tinggi Balok (mm)	Jumlah Lembaran	Jarak Antar Lembaran (mm)	Spesimen
450	-	-	LB
	6	60	LB-1
	4	200	LB-2
	5	112,5	LB-3
	Penuh	-	LB-4



Gambar 6. Model uji LB



Gambar 7. Model uji LB-1

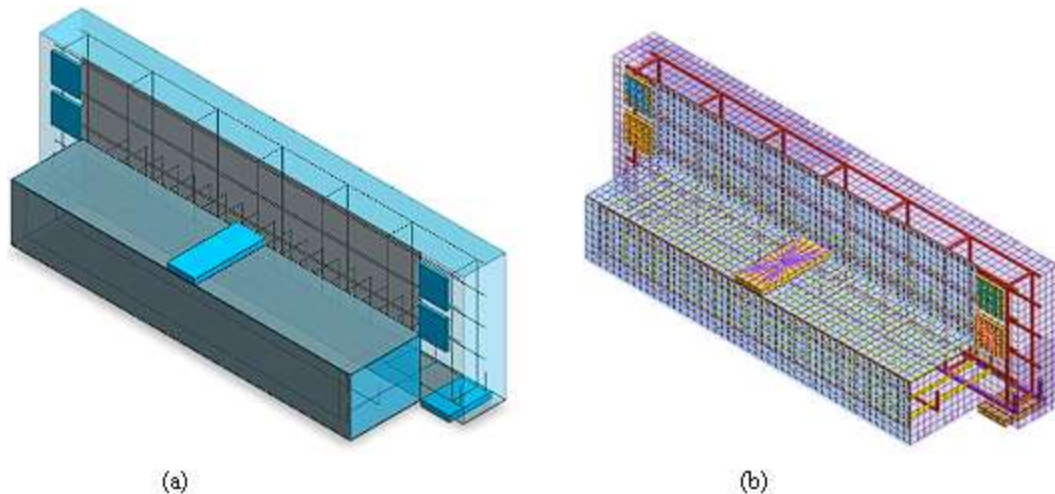


Gambar 8. Model uji (a) LB-2, (b) LB-3, (c) LB-4

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

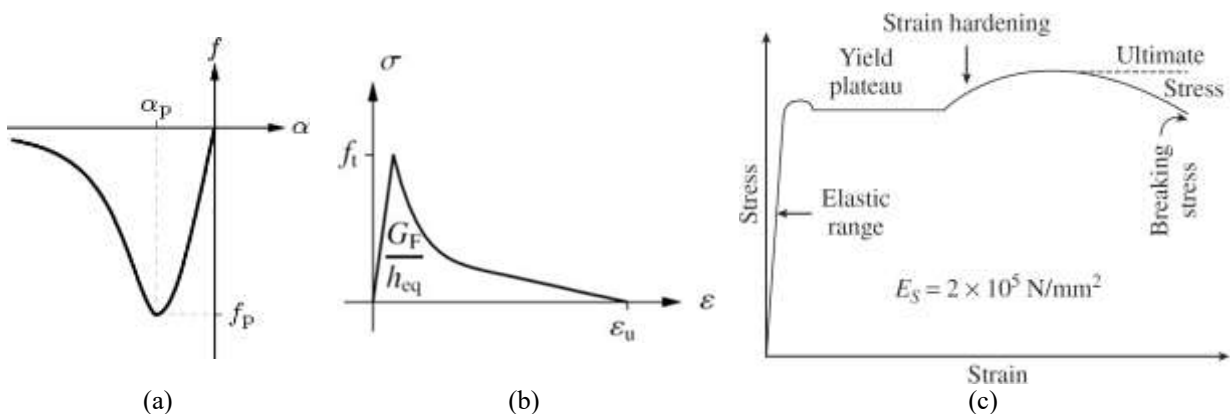
Dalam penelitian ini, model uji dimodelkan pada aplikasi MIDAS FEA NX sesuai dengan sketsa pemodelan pada pembahasan sebelumnya. Pemodelan dimulai dari pembuatan balok spandrel sebagai elemen *solid* yang dilanjutkan dengan pembuatan elemen garis sebagai digunakan sebagai tulangan. Selanjutnya, akan dimodelkan pelat dan CFRP pada balok spandrel dalam elemen *solid* lalu dilakukan *interface* agar pelat dan CFRP dapat terhubung dengan balok. Mutu beton yang digunakan mengacu pada jurnal Ayaad & Oukaili (2023) dimana untuk balok kontrol adalah 45 MPa

dan untuk balok dengan perkuatan adalah 41,6 MPa. Ukuran *meshing* yang dipakai dalam penelitian ini sebesar 25 mm (Gambar 9).



Gambar 9. Pemodelan LB-4 (a) geometri, (b) setelah *meshing*

Dari Gambar 10, analisis akan dilakukan dengan model *concrete smeared crack* dengan memasukkan fungsi tarik dan fungsi tekan yaitu *Hordijk* dan *Thorenfeldt*. Sementara untuk tulangan digunakan *stress-strain curve* dimana nilai-nilai tegangan-regangan pada tulangan akan dimasukkan sesuai dengan jurnal Ayaad & Oukaili (2023).



Gambar 10. Grafik Fungsi (a) *Thorenfeldt*, (b) *Hordijk*, (c) *Stress-Strain* Tulangan Baja (Subramanian, 2013)

Balok kontrol

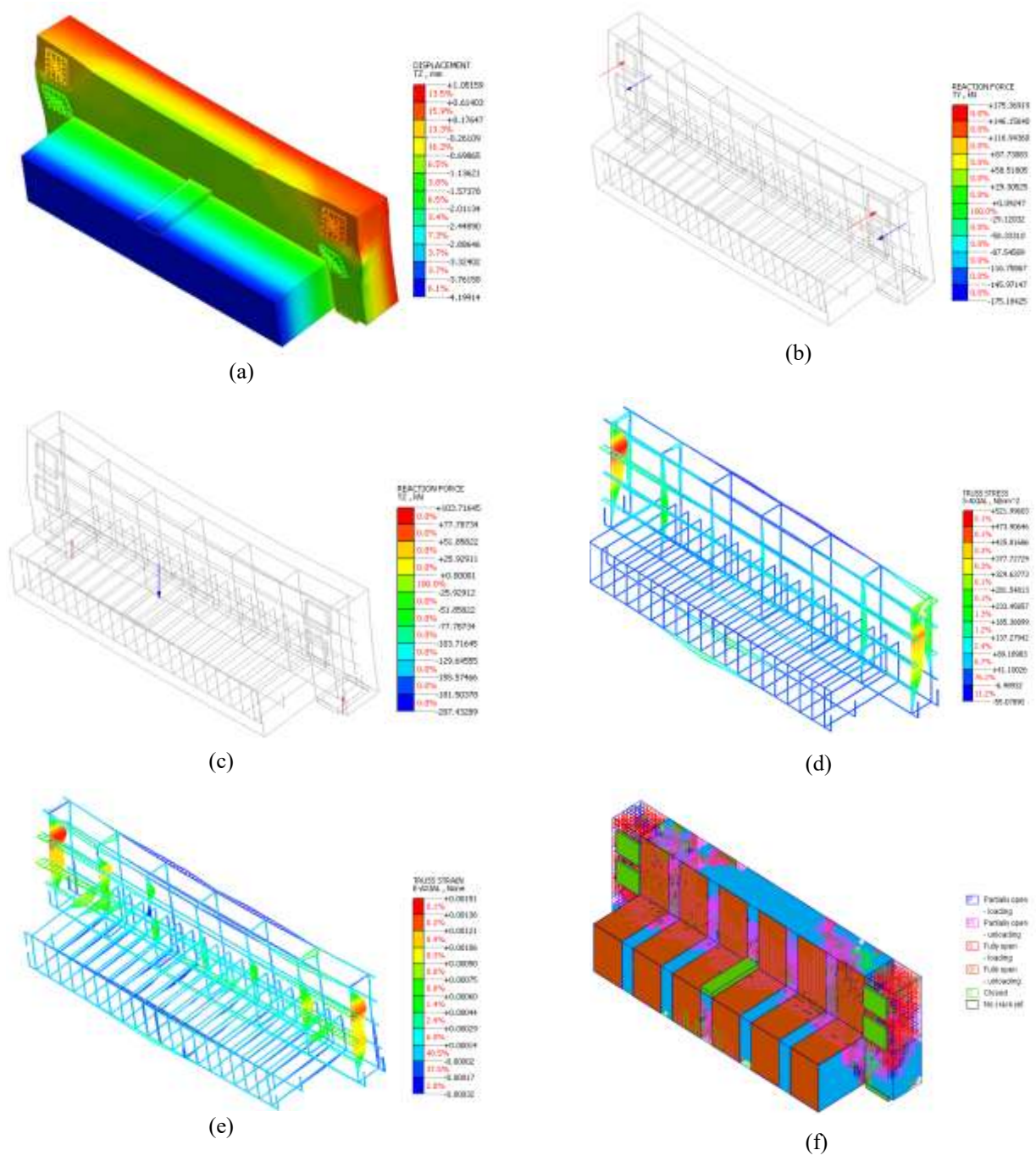
Analisis terhadap pemodelan balok kontrol akan dibandingkan hasilnya dengan hasil laboratorium yang dilakukan oleh Ayaad & Oukaili (2023). Gambar 11 menunjukkan bahwa defleksi terbesar balok terjadi pada bagian ujung sayap balok serta tegangan pada tulangan menunjukkan jika tulangan sudah leleh di bagian ujung badan balok. Gaya-gaya yang bekerja dalam balok terdiri dari reaksi vertikal pada kedua pelat di bawah balok serta reaksi horizontal pada empat pelat di bagian permukaan depan balok. Pola retak pada balok kontrol menunjukkan hancurnya beton pada bagian ujung bawah balok yang diteruskan hingga bagian tengah balok.

Hasil yang diperoleh dari hasil analisis metode elemen hingga dengan uji laboratorium menunjukkan adanya persamaan dari kedua metode. Perbedaan hasil diantara keduanya kurang lebih 10% yang menunjukkan hasil analisis menggunakan aplikasi MIDAS FEA NX dapat dilakukan (Tabel 2). Nilai momen torsi diperoleh dari beban maksimum pada tengah bentang yang dikalikan dengan jaraknya kepada reaksi vertikal yang bekerja pada balok spandrel.

Balok dengan CFRP

Pada balok dengan perkuatan CFRP, terdapat 4 (empat) model uji yang terdiri dari 4 (empat) lembar CFRP, 5 (lima) lembar CFRP, 6 (enam) lembar CFRP, dan lembaran CFRP memenuhi permukaan balok. Lebar lembaran CFRP yang

digunakan sebesar 150 mm. Model uji LB-1 akan dibandingkan dengan hasil uji laboratorium dalam pemodelan balok spandrel dengan CFRP (Tabel 3).



Gambar 11. Hasil analisis metode elemen hingga model uji LB (a) Lentutan, (b) Reaksi horizontal, (c) Reaksi vertikal, (d) Tegangan pada tulangan, (e) Regangan pada tulangan, (f) Pola retak

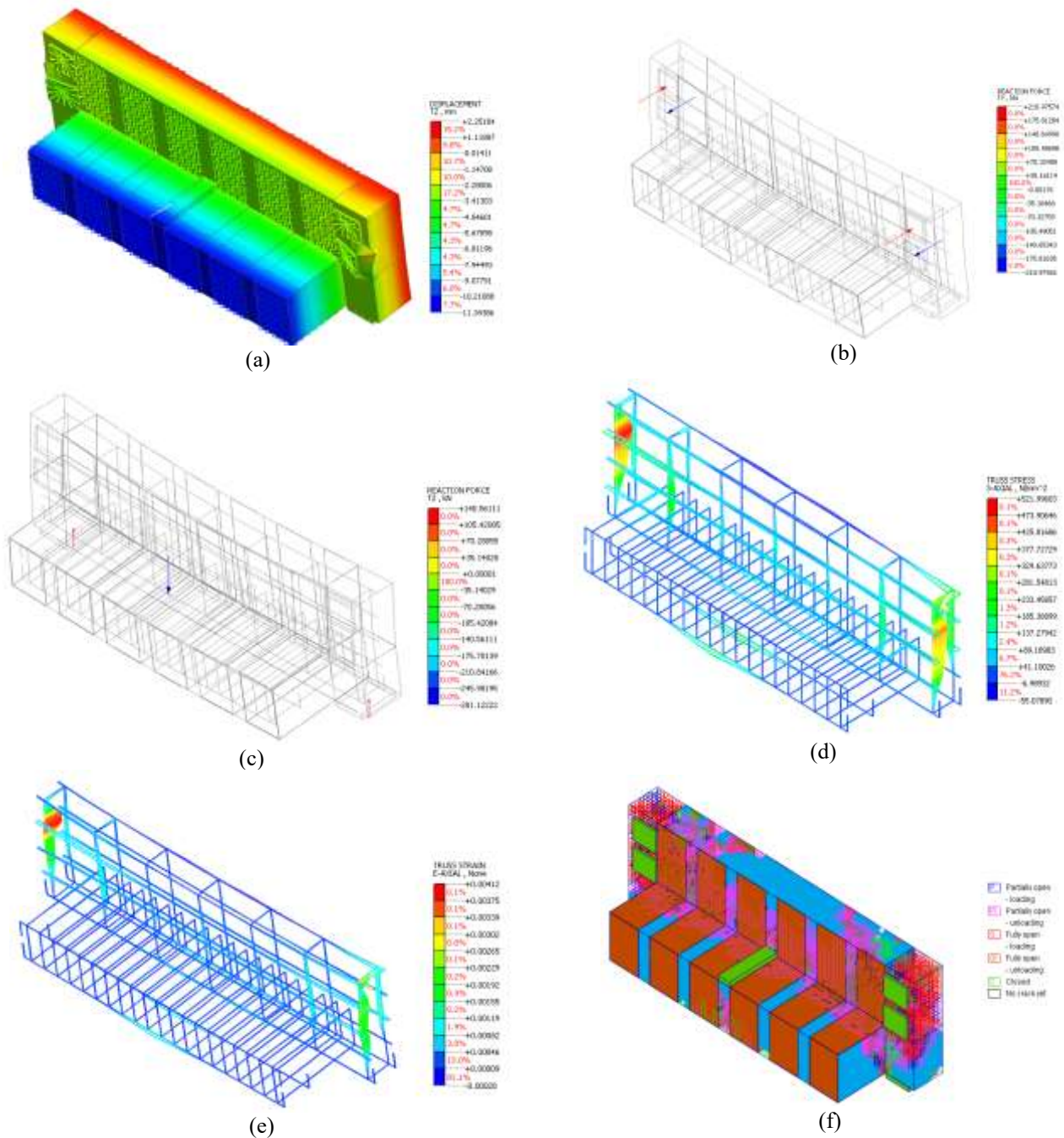
Tabel 2. Persentase perbedaan antara uji lab dan analisis elemen hingga model uji LB

Model Uji	LB (Lab)	LB (Numerik)	Perbedaan (%)
Beban (kN)	200	207,433	3,717
Reaksi Vertikal Maksimum (kN)	99,3	103,716	4,447
Momen Torsi (kNm)	40	41,487	3,717

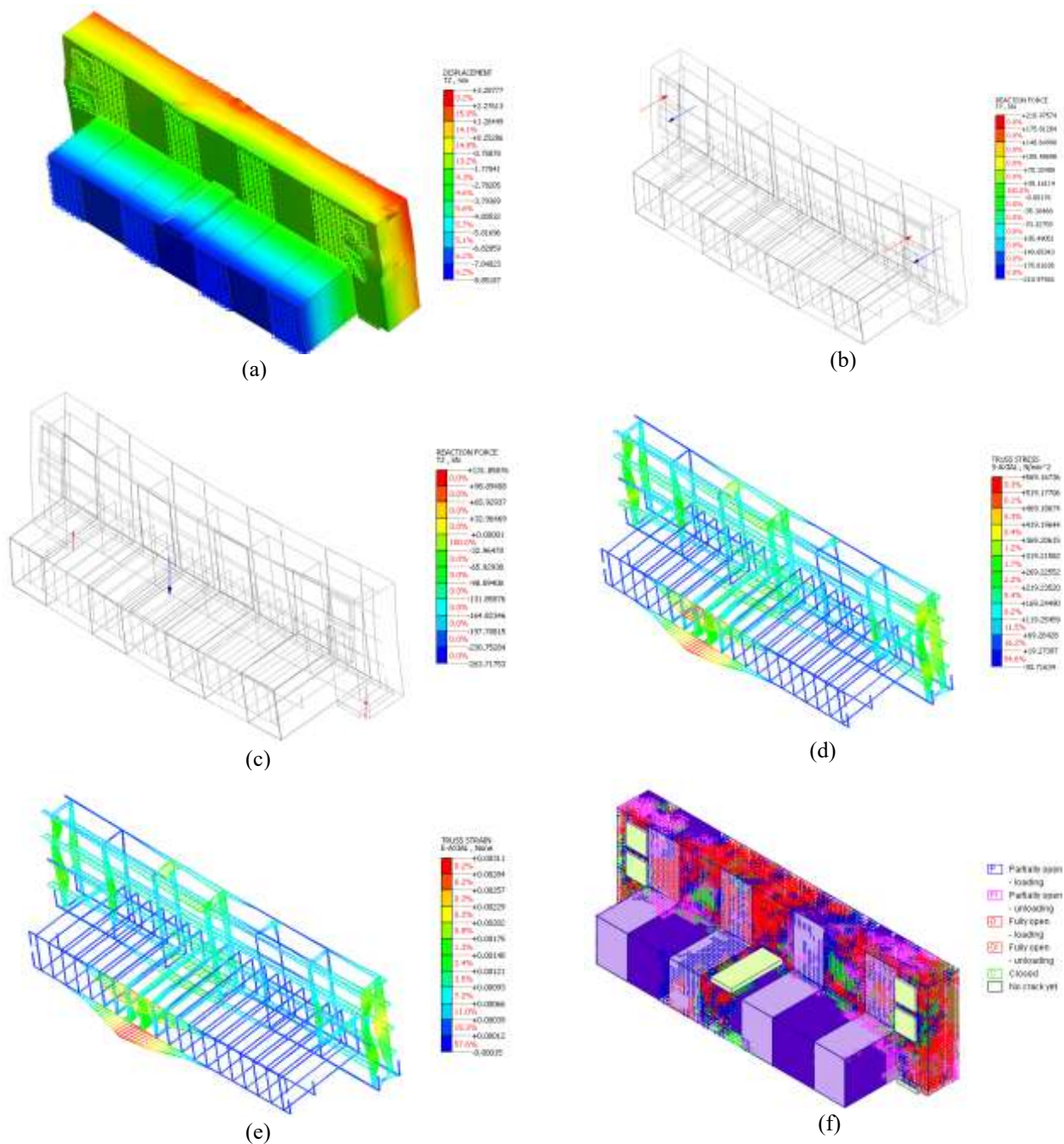
Tabel 3. Persentase perbedaan antara uji lab dan analisis elemen hingga model uji LB-1

Model Uji	LB-1 (Lab)	LB-1 (Numerik)	Perbedaan (%)
Beban (kN)	276	281,122	1,856
Reaksi Vertikal Maksimum (kN)	135,3	140,561	3,888
Momen Torsi (kNm)	55,2	56,224	1,856

Dari Gambar 12-15 diperoleh bahwa balok mengalami peningkatan kapasitas seiring dengan bertambahnya lembaran CFRP yang terpasang pada balok spandrel. Lendutan yang terjadi pada balok tereduksi dengan adanya lembaran CFRP yang membuat balok spandrel lebih kaku dibanding balok kontrol. Selain itu, akibat beban vertikal eksentrik pada balok spandrel menyebabkan adanya rotasi pada balok spandrel serta pola retak yang unik membentuk pada balok spandrel.

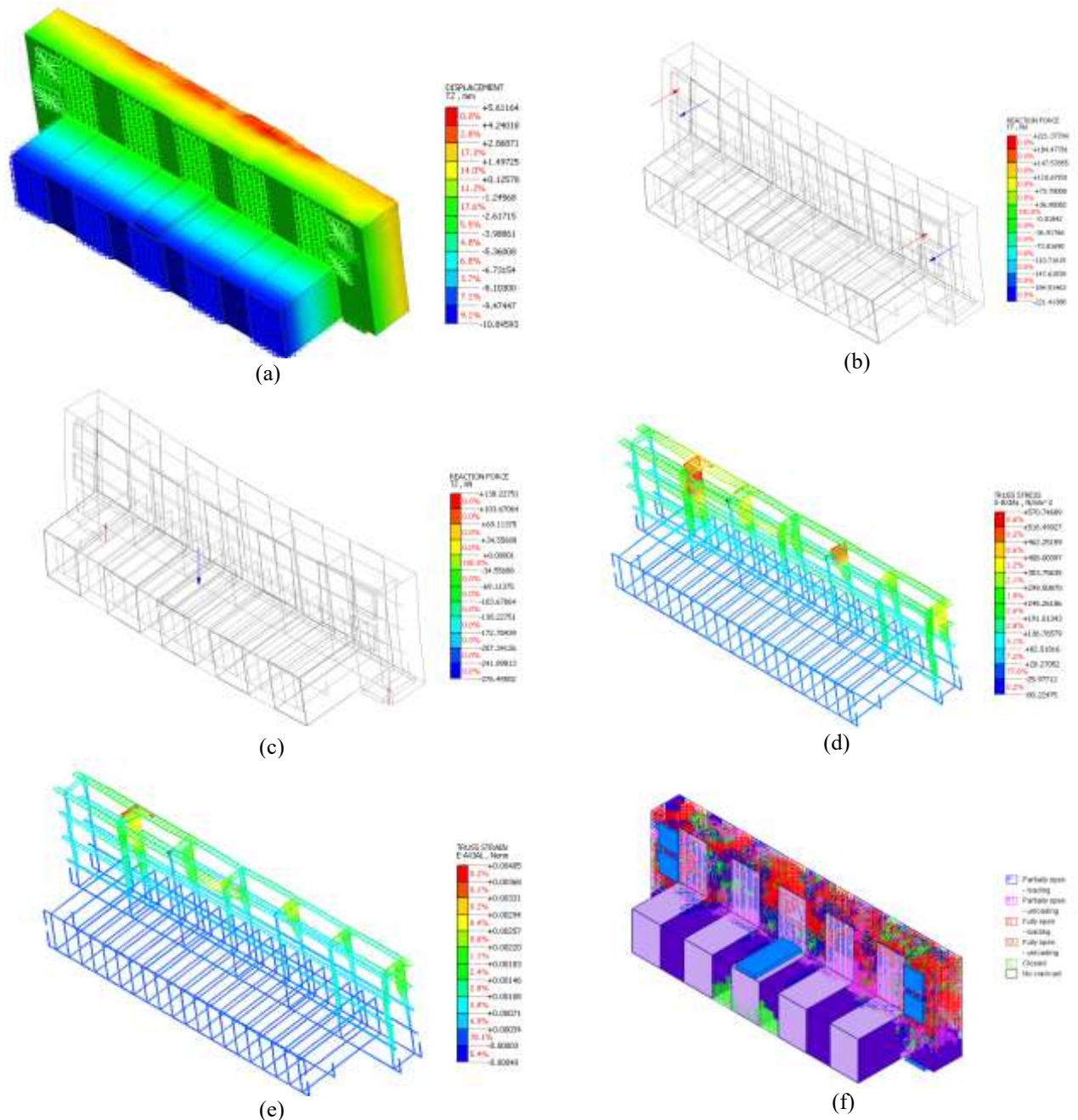


Gambar 12. Hasil analisis metode elemen hingga model uji LB-1 (a) Lendutan, (b) Reaksi horizontal, (c) Reaksi vertikal, (d) Tegangan pada tulangan, (e) Regangan pada tulangan, (f) Pola retak



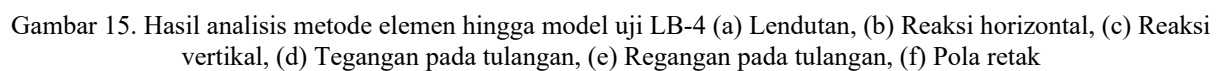
Gambar 13. Hasil analisis metode elemen hingga model uji LB-2 (a) Lendutan, (b) Reaksi horizontal, (c) Reaksi vertikal, (d) Tegangan pada tulangan, (e) Regangan pada tulangan, (f) Pola retak

Berdasarkan Gambar 15, diperoleh bahwa model uji LB-4 memiliki kapasitas terbesar dibandingkan model uji lainnya. Pemasangan lembaran CFRP pada balok spandrel terbukti efektif dalam meningkatkan kapasitas torsi balok spandrel. Material CFRP yang kuat dalam menahan tarikan terbukti dapat membantu balok spandrel agar tidak terjadi kegagalan tarik/getas.

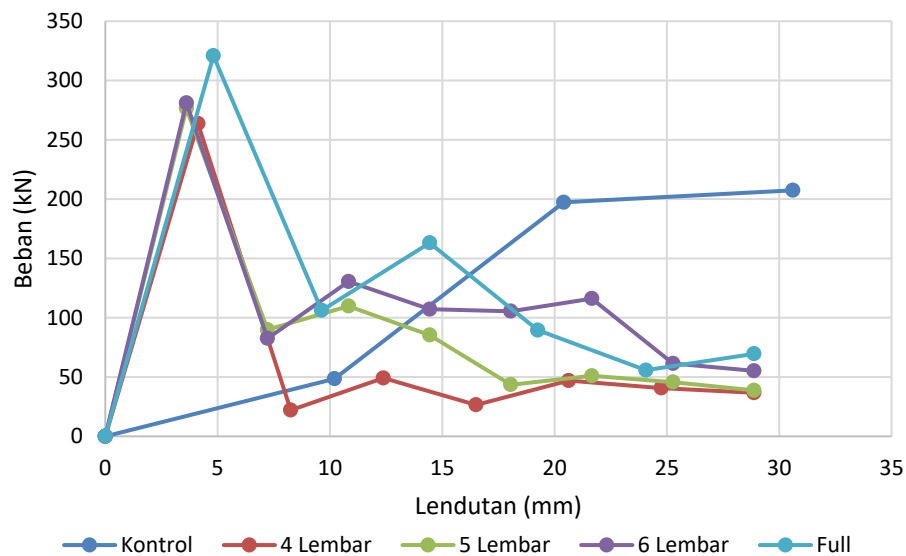


Gambar 14. Hasil analisis metode elemen hingga model uji LB-3 (a) Lendutan, (b) Reaksi horizontal, (c) Reaksi vertikal, (d) Tegangan pada tulangan, (e) Regangan pada tulangan, (f) Pola retak

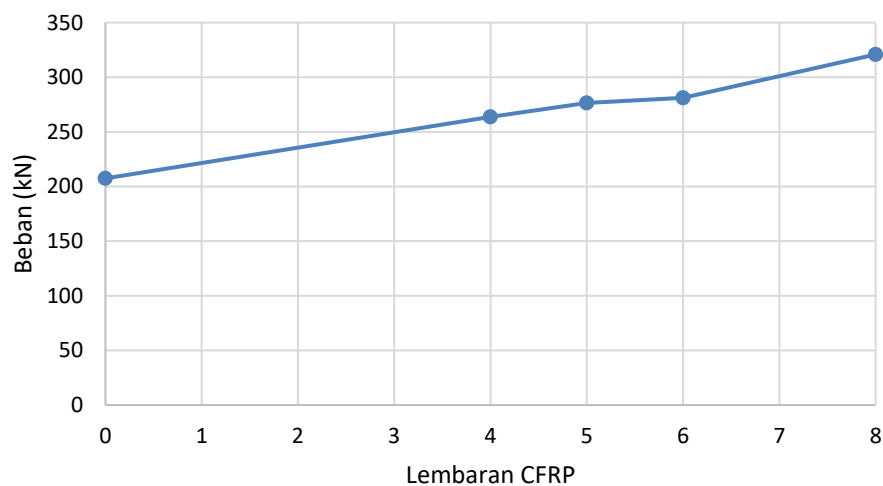
Gambar 16 menunjukkan bahwa pada balok kontrol beban yang dapat diterima balok akan terus meningkatkan seiring dengan bertambahnya lendutan pada balok. Pada balok dengan CFRP berlaku sebaliknya saat balok telah mencapai kapasitas maksimum, pembebanan terhadap balok tersebut akan terus berkurang hingga balok tersebut hancur.



803



Gambar 16. Grafik beban terhadap lendutan menggunakan analisis elemen hingga



Gambar 17. Grafik beban maksimum terhadap banyak lembaran CFRP menggunakan analisis elemen hingga

Tabel 4. Persentase peningkatan kapasitas torsi balok spandrel

Model Uji	Momen Torsi (kNm)	Peningkatan (%)	Keterangan
LB	41,487	-	Kontrol
LB-2	52,744	27,136	4 Lembar CFRP
LB-3	55,291	33,274	5 Lembar CFRP
LB-1	56,224	35,524	6 Lembar CFRP
LB-4	64,167	54,669	Dipenuhi Lembaran CFRP

4. KESIMPULAN

Kesimpulan dapat diambil berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang diperoleh sebagai berikut:

1. Beban vertikal pada sayap balok spandrel menyebabkan torsi. Namun, penggunaan lembaran CFRP terbukti meningkatkan kapasitas torsi balok spandrel pada model uji LB-4 sebesar 55% dibanding balok kontrol.
2. Pola retak yang terjadi pada seluruh model uji serupa, dimulai pada bagian ujung balok dan akan menerus sampai bagian tengah balok.
3. Lendutan balok berkurang dengan adanya lembaran CFRP, yang mampu mengurangi lendutan hingga 6% dibanding balok kontrol.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfanov, T., & Leman, S. A. (2024). Analisis performa balok T beton bertulang dengan serat polimer menggunakan aplikasi MIDAS FEA NX. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(3), 859-872. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i3.27933>
- Ayaad, N., & Oukaili, N. K. (2023). Efficiency of CFRP torsional strengthening technique for L-shaped spandrel reinforced concrete beams. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 32(1), 20220243. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0243>
- Babaeidarabad, S., Loreto, G., & Nanni, A. (2014). Flexural strengthening of RC beams with an externally bonded fabric-reinforced cementitious matrix. *Journal of Composites for Construction*, 18(5), 04014009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000473](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000473)
- Balaguru, P., Nanni, A., & Giancaspro, J. (2008). *FRP composites for reinforced and prestressed concrete structures: A guide to fundamentals and design for repair and retrofit*. CRC Press.
- Bank, L. (2006). *Composites for construction: Structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons.
- Hassoun, M. N., & Al-Manaseer, A. (2020). *Structural concrete: Theory and design* (edisi ke 6). Wiley.
- Khan, A. Q., Pimanmas, A., & Chindapasirt, P. (2023). Flexural strengthening of RC beams using sisal fibre reinforced polymer (SFRP) composite with anchorage systems. *Results in Engineering*, 18, 101116. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101116>
- Michael, M., & Leman, S. (2023). Performance analysis of reinforced concrete beam with GFRP using finite element method. *International Journal of Application on Sciences, Technology and Engineering*, 1(1), 95-104. <https://doi.org/10.24912/ijaste.v1.i1.95-104>
- Oñate, E. (2009). *Structural analysis with the finite element method (Linear statics, Vol. 1: Basis and solids)*. Springer.
- Purmawinata, A., & Leo, E. (2020). Analisis penggunaan carbon fiber reinforced plate pada kapasitas lentur beton bertulang dengan metode elemen hingga. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(2), 389-398. <https://doi.org/10.24912/jmts.v3i2.6952>
- Sandjaya, A., Fathurrahman, M. R., & Leman, S. A. (2024). Analisis panjang CFRP kolom pada perkuatan exterior beam-column joint beton bertulang menggunakan MIDAS FEA. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(3), 931-936. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i3.24948>
- Sebastian, D., & Leman, S. (2024). Analisis perbandingan kapasitas balok komposit standar dengan balok komposit kastela menggunakan aplikasi MIDAS FEA NX. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(2), 683-696. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i2.27931>
- Subramanian, N. (2013). *Design of reinforced concrete structures*. Oxford University Press.
- Widjaya, R., & Leman, S. (2024). Analisis kapasitas balok komposit dengan variasi tulangan pelat terhadap keruntuhan kolom menggunakan aplikasi MIDAS FEA. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(1), 149-164. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i1.25105>
- Wight, J. K., & MacGregor, J. K. (2012). *Reinforced concrete: Mechanics and designs* (edisi ke 6). Pearson.

