

# EVALUASI PENGGUNAAN LEMBARAN SERAT KARBON TERHADAP KAPASITAS TORSI BALOK L SPANDREL BETON BERTULANG

Sunarjo Leman<sup>a\*</sup>, Davin Vincent Pratama<sup>b</sup>, Daniel Christianto<sup>c</sup>, Tavio<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

[sunarjo@ft.untar.ac.id](mailto:sunarjo@ft.untar.ac.id)

<sup>b</sup> Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

[davin.325210032@stu.untar.ac.id](mailto:davin.325210032@stu.untar.ac.id)

<sup>c</sup> Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia

[danielc@ft.untar.ac.id](mailto:danielc@ft.untar.ac.id)

<sup>d</sup> Department of Civil Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

[tavio@its.ac.id](mailto:tavio@its.ac.id)

## ABSTRAK

Struktur bangunan berbahan beton bertulang memiliki kecenderungan mengalami penurunan kapasitas seiring berjalannya waktu, yang disebabkan oleh faktor-faktor seperti beban berulang, korosi pada tulangan baja, dan pengaruh lingkungan seperti kelembapan tinggi, perubahan suhu, serta paparan bahan kimia agresif. Penurunan ini berdampak pada berkurangnya kemampuan struktur dalam menahan gaya-gaya eksternal, termasuk beban torsi, yang dapat memicu kerusakan berupa retak, deformasi berlebihan, hingga kegagalan struktur secara menyeluruh. Oleh karena itu, diperlukan metode perkuatan yang efektif untuk menjaga dan memulihkan kinerja elemen struktur yang mengalami degradasi. Salah satu teknologi perkuatan yang terbukti efisien adalah penggunaan material komposit Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP), yang dikenal memiliki kekuatan tarik sangat tinggi, bobot ringan, fleksibel, serta ketahanan yang baik terhadap korosi dan lingkungan agresif. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penggunaan CFRP terhadap peningkatan kapasitas torsi balok L beton bertulang dengan dimensi 1500 mm × 400 mm × 650 mm dan kombinasi tulangan D10, D12, dan D16. Perkuatan dilakukan dengan menempelkan lembaran CFRP selebar 150 mm pada permukaan balok, menggunakan variasi jarak antar lembaran untuk menentukan konfigurasi yang paling efektif, sehingga menghasilkan lima model uji. Simulasi dilakukan secara numerik menggunakan perangkat lunak MIDAS FEA NX berbasis metode elemen hingga untuk mengevaluasi peningkatan kapasitas torsi dan membandingkan hasilnya dengan data laboratorium. Hasil penelitian ini diharapkan memberikan gambaran yang lebih akurat mengenai efektivitas CFRP dalam meningkatkan performa struktur pasca-perkuatan, serta menjadi acuan dalam perencanaan rehabilitasi struktur yang telah mengalami penurunan kinerja.

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

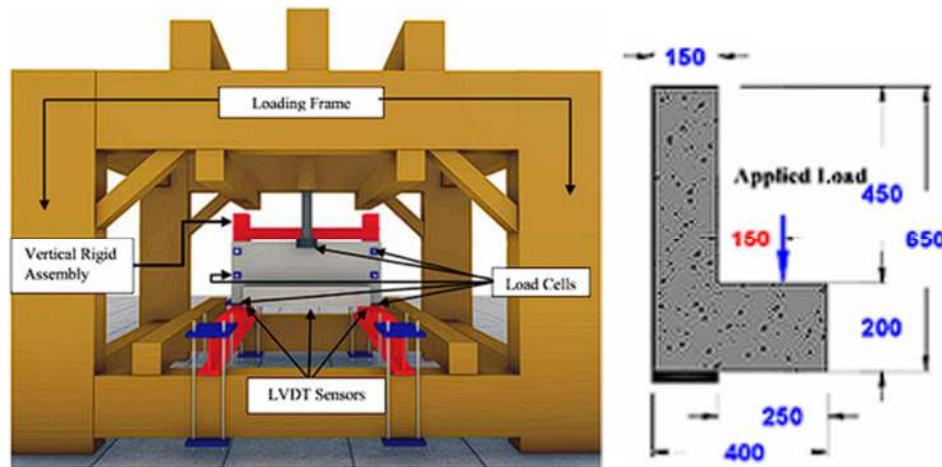
## 1. PENDAHULUAN

### Latar Belakang

Beton bertulang merupakan material komposit dari beton dan baja yang umum digunakan karena kemampuannya dalam menahan tekan dan tarik (Widjaya & Leman, 2024). Seiring waktu, struktur beton dapat mengalami kerusakan sehingga diperlukan metode peningkatan kekuatan struktural (Babaeidarabad et al., 2014). Salah satu metode yang banyak digunakan adalah penggunaan Fiber Reinforced Polymer (FRP), membentuk struktur komposit dengan beton (Sebastian & Leman, 2024). Di antara jenis FRP, *Carbon Fiber-Reinforced Polymer* (CFRP) menjadi pilihan unggulan karena kekuatan dan kekakuan yang tinggi, meskipun harganya lebih mahal (Alfanov & Leman, 2024).

CFRP terbukti mampu meningkatkan kapasitas lentur pada balok beton bertulang (Michael & Leman, 2023), namun beberapa studi menunjukkan bahwa modifikasi dimensi lembaran CFRP dapat memberikan hasil yang lebih optimal (Purmawinata & Leo, 2020). Penelitian oleh Ayaad dan Oukaili (2023) menunjukkan bahwa penguatan balok L *spandrel* dalam bentuk lembaran CFRP dapat meningkatkan kapasitas torsi secara signifikan. Mereka menggunakan metode *wet lay-up* dengan dua tipe dimensi balok dan konfigurasi pembebanan dua tahap untuk memahami efisiensi penguatan CFRP pada struktur yang menerima beban torsi. Ukuran balok yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini berukuran 650 mm × 150 mm dengan dimensi sayap 250 mm × 200 mm. Bentang balok yang digunakan memiliki panjang 1500 mm dengan bentang sayap dipotong sebesar 150 mm pada kedua sisi balok *spandrel*. CFRP yang ditempelkan pada balok *spandrel* membentang dari sisi depan, bawah, dan belakang balok dengan lebar setiap

lembaran sebesar 150 mm. Penelitian ini akan menguji bagaimana kapasitas torsi suatu balok L *spandrel* jika dibebankan secara mrontonik untuk mengetahui bagaimana kapasitas balok L *spandrel* dengan CFRP dan tanpa CFRP.



**Gambar 1.** Metode Pelaksanaan Penelitian dan Dimensi Balok L *Spandrel* (Ayaad & Oukaili, 2023)

### Balok *spandrel*

Dalam sistem struktur lantai balok-pelat, elemen balok yang terletak di tepi atau pinggiran lantai dikenal sebagai balok *spandrel*. Balok *spandrel* ini berfungsi sebagai penopang utama pada sisi tepi pelat lantai dan umumnya dicor secara monolitik bersama pelat, sehingga keduanya membentuk satu kesatuan struktural yang utuh. Jenis lantai ini memiliki ciri khas yaitu pelat hanya berada pada satu sisi balok *spandrel*, yang menyebabkan penampang balok menjadi tidak simetris ketika menerima beban vertikal (Hassoun & Al-Manaseer, 2020). Ketidaksimetrian penampang ini sangat penting untuk dipertimbangkan karena akan memengaruhi perilaku struktur secara keseluruhan, terutama dalam hal distribusi gaya dalam balok.

Dalam analisis struktur balok *spandrel*, terlihat bahwa separuh dari bagian balok didukung oleh pelat, sementara separuh lainnya dibiarkan bebas tanpa pelat di atasnya. Beban vertikal yang bekerja pada balok menyebabkan penampang mengalami lentur dan geser dengan kondisi penampang yang tidak simetris. Analisis mengasumsikan bahwa bidang kerja beban melalui pusat geser penampang, namun konfigurasi tersebut tetap dapat menyebabkan timbulnya perpindahan vertikal dan lateral pada balok antara tumpuan satu dengan lainnya. Beban yang bekerja akan menghasilkan momen lentur, dan momen ini harus dilawan oleh momen internal yang berasal dari gaya tarik dan tekan pada penampang terhadap sumbu horizontal (Wight & MacGregor, 2012).

### Fiber Reinforced Polymer (FRP)

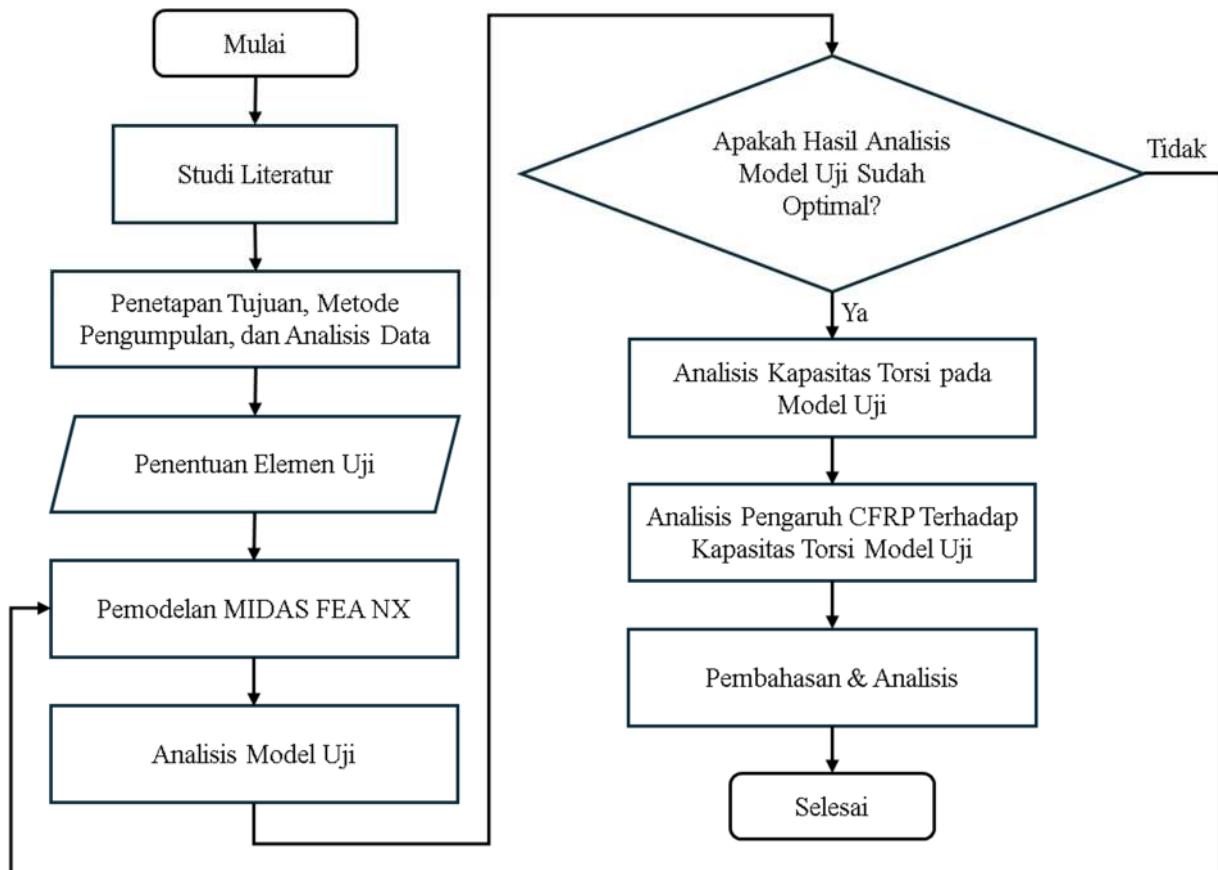
*Fiber Reinforced Polymer* (FRP) adalah material komposit yang terdiri dari serat berkekuatan tinggi yang diperkuat oleh matriks pengikat, membentuk struktur yang solid. Serat dalam FRP berfungsi memberikan kekuatan dan kekakuan, sementara matriks atau resin berperan sebagai media untuk mentransfer tegangan dan regangan antar serat. FRP memiliki beberapa keunggulan dibandingkan material struktural konvensional seperti baja, di antaranya adalah bobot yang ringan, ketahanan terhadap korosi, serta kemudahan dalam proses pemasangan. Karena keunggulan tersebut, FRP banyak dimanfaatkan dalam perkuatan dan rehabilitasi struktur beton bertulang maupun beton prategang (Balaguru et al., 2008). Salah satu jenis FRP yang paling umum digunakan dalam bidang teknik struktur adalah *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP), khususnya dalam bentuk lembaran (Bank, 2006). CFRP memiliki kekuatan tarik yang sangat tinggi dan menawarkan modulus elastisitas paling tinggi dibandingkan jenis FRP lainnya, menjadikannya pilihan utama dalam berbagai aplikasi rekayasa struktural.

### Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan pendekatan numerik yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan yang menggambarkan perilaku fenomena alam. Perilaku tersebut umumnya direpresentasikan melalui persamaan diferensial atau integral, sehingga FEM menjadi teknik numerik untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial atau integral. Ketika diterapkan pada suatu komponen, FEM dapat memodelkan perubahan satu atau lebih variabel terhadap ruang atau waktu. Dalam analisis struktur, FEM digunakan untuk menghitung perpindahan, tegangan, dan regangan dalam suatu struktur akibat beban yang diterapkan (Oñate, 2009).

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian dimulai dengan pembuatan diagram alir penelitian yang bertujuan untuk memberikan gambaran umum mengenai tahapan-tahapan yang akan dilakukan selama proses penelitian. Diagram alir ini disusun secara sistematis untuk mempermudah pemahaman alur kerja, mulai dari studi literatur, penetapan tujuan, hingga analisis data. Selain itu, diagram ini juga mencakup tahapan penentuan elemen uji, analisis model uji, validasi hasil, serta pembahasan dan analisis dari pemodelan.

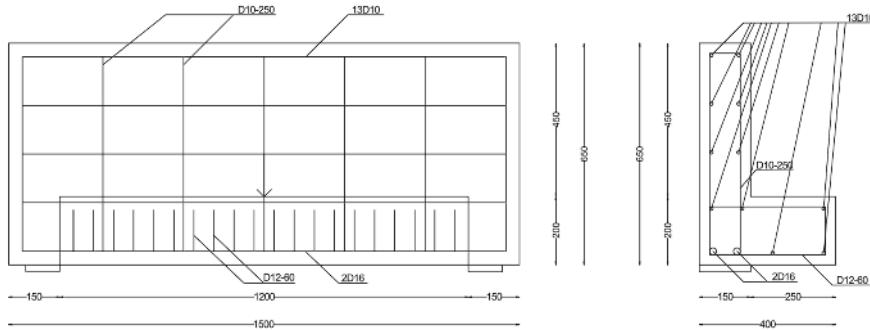


**Gambar 2.** Diagram Alir Penelitian

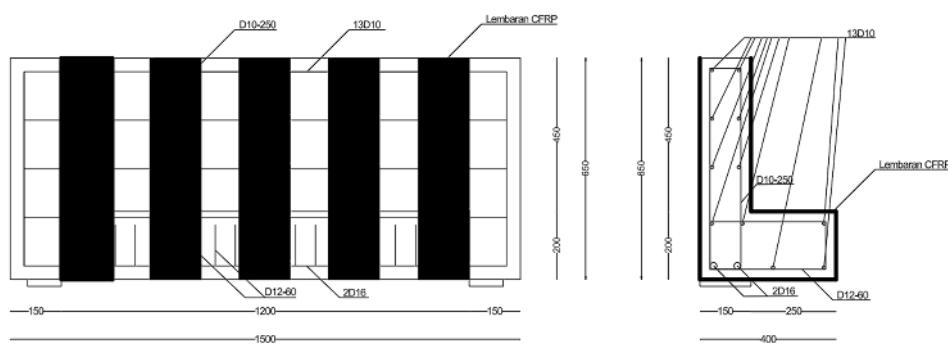
Pada penelitian ini, terdapat 5 model uji yang dimodelkan berdasarkan uji laboratorium yang dilakukan oleh Ayaad & Oukaili (2023). Penelitian ini akan diuji menggunakan metode elemen hingga dan akan dibandingkan dengan uji laboratorium yang selanjutnya akan dikembangkan menjadi berbagai macam variasi pemasangan lembaran CFRP.

**Tabel 1.** Model Uji Balok L *Spandrel*

| Tinggi Balok (mm) | Jumlah Lembaran | Jarak Antar Lembaran (mm) | Spesimen |
|-------------------|-----------------|---------------------------|----------|
| 650               | -               | -                         | LA       |
|                   | 6               | 60                        | LA-1     |
|                   | 5               | 200                       | LA-2     |
|                   | 4               | 112,5                     | LA-3     |
|                   | Penuh           | -                         | LA-4     |



**Gambar 3.** Ilustrasi Model Uji Tanpa Perkuatan (LA)

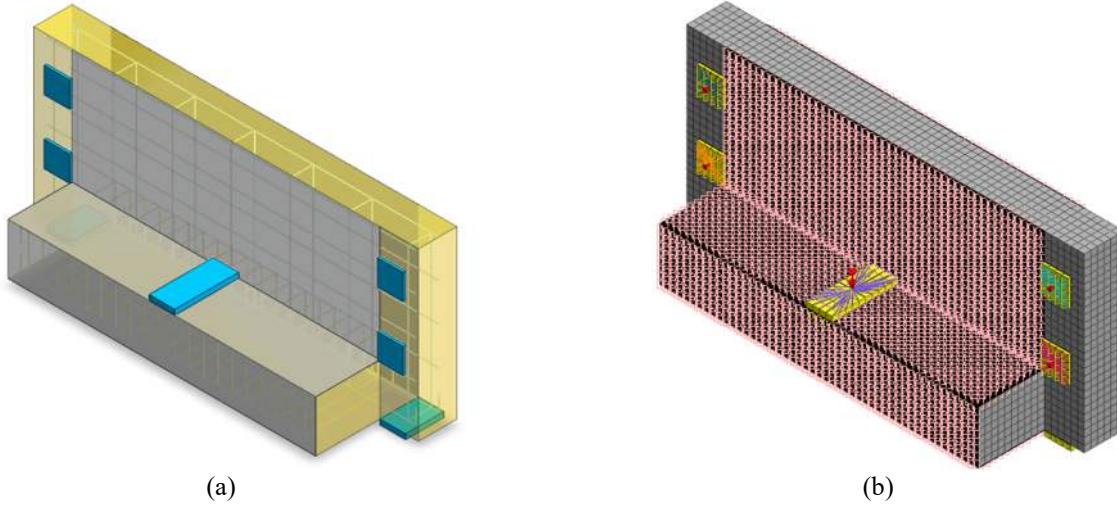


**Gambar 4.** Ilustrasi Model Uji Dengan Perkuatan Lembaran CFRP (LA-1)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini, pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak MIDAS FEA NX, dengan mengikuti sketsa pemodelan yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Proses pemodelan dimulai dengan pembuatan balok *spandrel* menggunakan elemen *solid*, kemudian dilanjutkan dengan pembuatan elemen garis untuk merepresentasikan tulangan baja. Selanjutnya, pelat dan lembaran CFRP dimodelkan sebagai elemen *solid* yang ditempelkan pada balok *spandrel*. Untuk menghubungkan antara pelat, CFRP, dan struktur balok, digunakan *interface* sebagai perekat antar elemen.

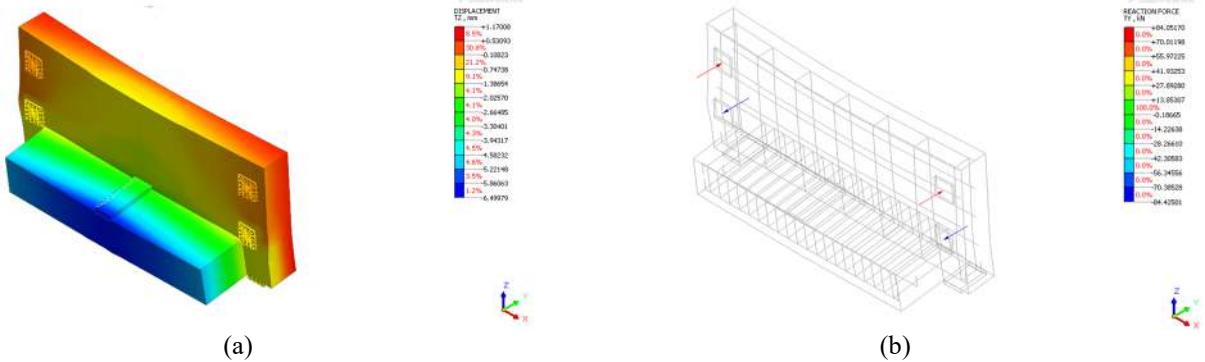
Kekuatan beton yang digunakan dalam model merujuk pada nilai yang digunakan oleh Ayaad & Oukaili (2023) dalam jurnalnya, yaitu 43,2 MPa untuk balok kontrol dan 44 MPa untuk balok yang telah diperkuat dengan CFRP. Ukuran *mesh* sebesar 25 mm diterapkan secara konsisten pada seluruh model guna mencapai keseimbangan antara efisiensi komputasi dan ketelitian hasil. Analisis dalam penelitian ini menggunakan model retak sebar (*concrete smeared crack*) untuk beton, yang mencakup fungsi tarik beton menggunakan *Hordijk* dan fungsi tekan beton menggunakan *Thorenfeldt*. Untuk kurva tegangan-regangan digunakan pada tulangan baja dan CFRP.

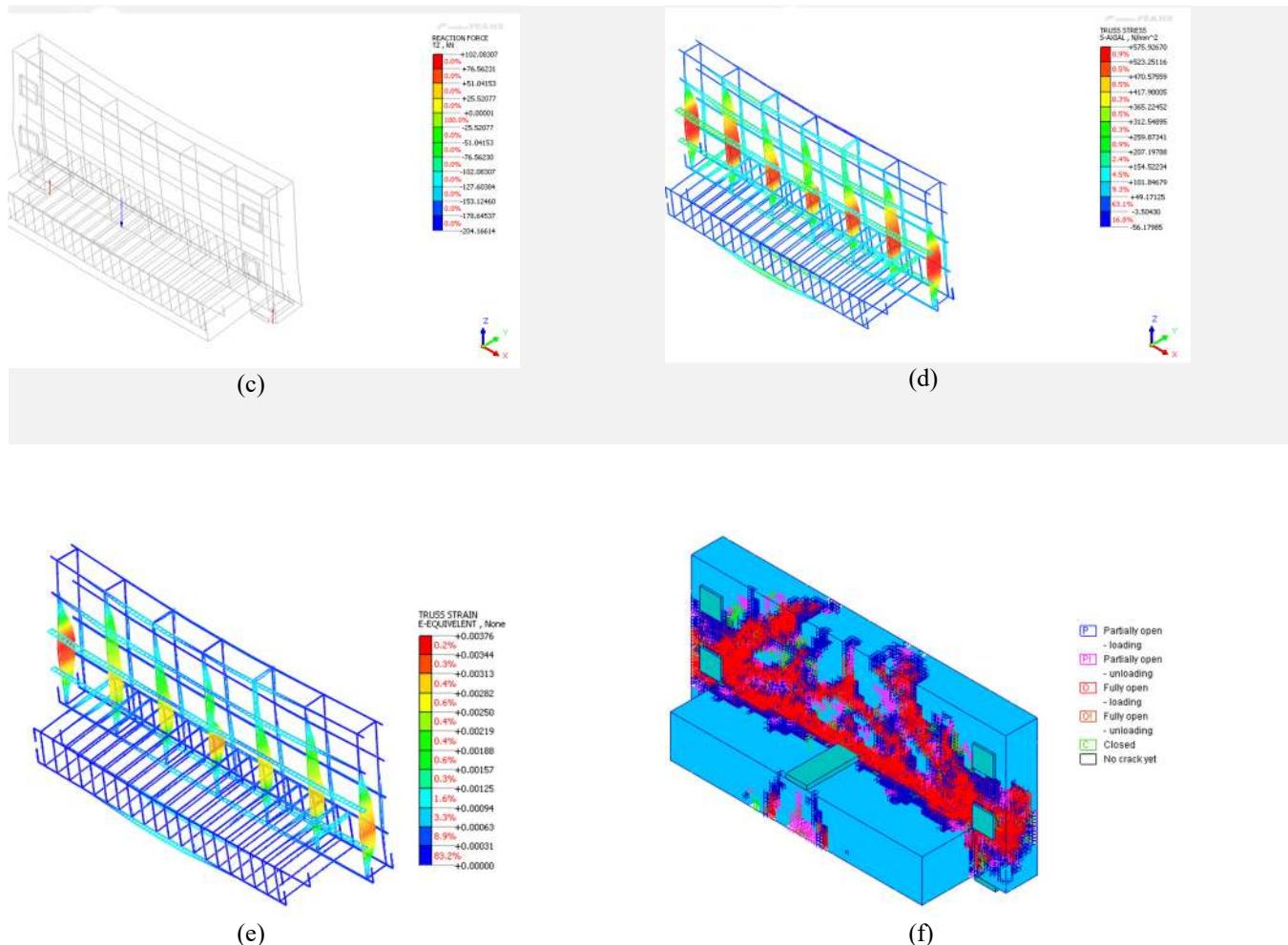


**Gambar 4.** Pemodelan LA-4 (a) geometri, (b) *meshing*

### Balok Kontrol

Analisis pada model balok kontrol akan dibandingkan dengan data hasil uji laboratorium yang dilakukan oleh Ayaad & Oukaili (2023). Perilaku struktur balok spandrel memperlihatkan bahwa defleksi maksimum terjadi di area ujung sayap balok, sementara distribusi tegangan pada tulangan menunjukkan bahwa tulangan mengalami leleh di bagian ujung badan balok. Gaya-gaya internal yang bekerja dalam balok terdiri dari reaksi vertikal yang muncul pada kedua sisi pelat di bawah balok, serta reaksi horizontal yang terjadi pada keempat pelat di bagian permukaan depan balok. Pola keretakan pada balok kontrol memperlihatkan adanya kerusakan beton yang dimulai dari bagian bawah ujung balok dan menjalar hingga ke bagian tengah balok.





**Gambar 5.** Hasil Analisis Metode Elemen Hingga Model Uji LA (a) Lendutan, (b) Reaksi Horizontal, (c) Reaksi Vertikal, (d) Tegangan pada Tulangan, (e) Regangan pada Tulangan, (f) Pola Retak

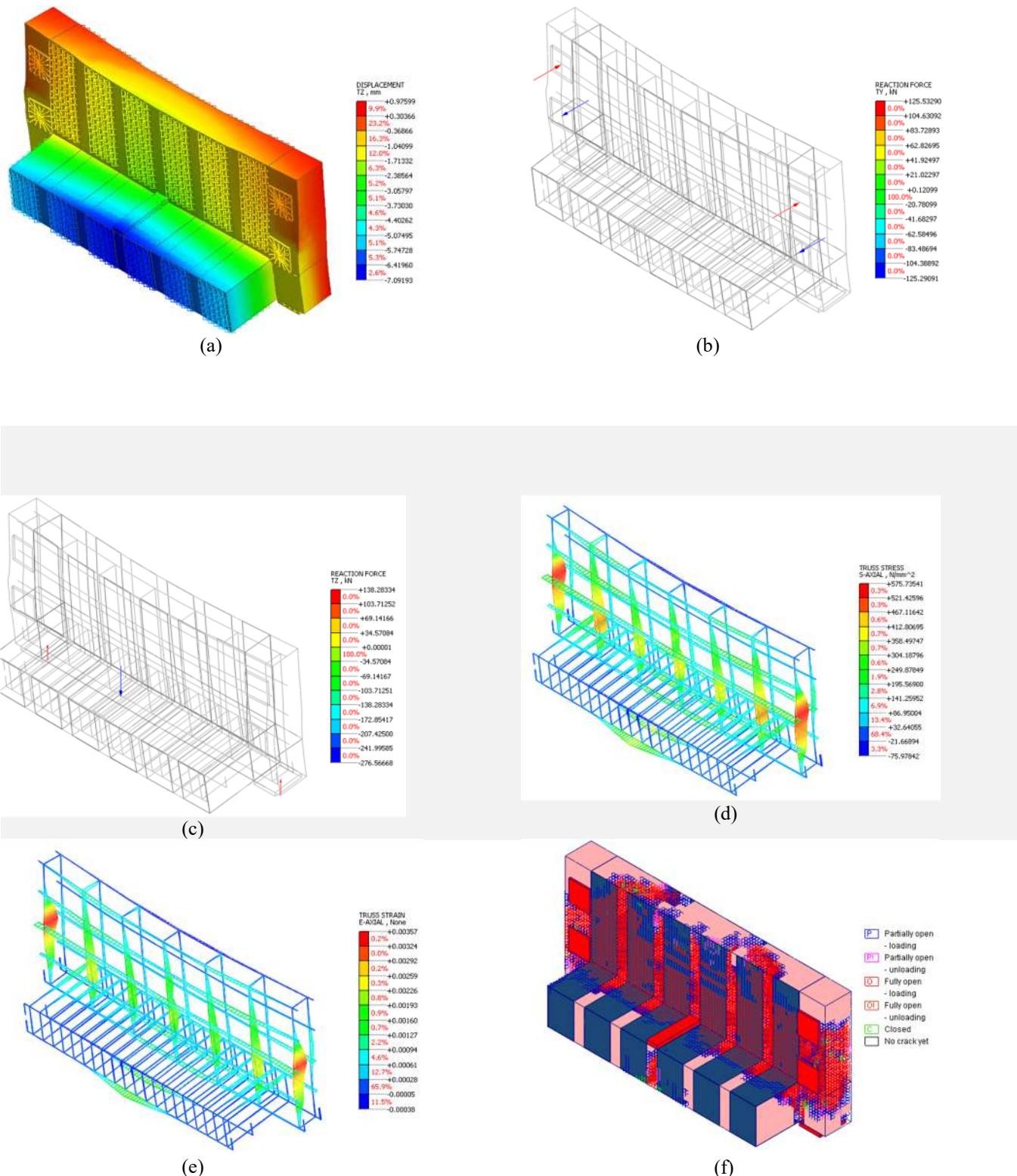
Berdasarkan hasil yang telah diperoleh diatas, dapat diambil nilai – nilai yang terdapat dari setiap hasil yang tersedia untuk dibandingkan dengan uji laboratorium sebagai berikut.

**Tabel 2.** Persentase Perbedaan Uji Lab dan Analisis Elemen Hingga Model Uji LA

| Model Uji                     | LA (Lab) | LA (Numerik) | Perbedaan (%) |
|-------------------------------|----------|--------------|---------------|
| Beban (kN)                    | 190      | 204,166      | 7,456         |
| Reaksi Vertikal Maksimum (kN) | 94,5     | 102,083      | 8,024         |
| Momen Torsi (kNm)             | 38       | 40,833       | 7,456         |

### Balok dengan CFRP

Pada balok yang diperkuat dengan CFRP, terdapat empat variasi model uji yang terdiri dari pemasangan masing-masing 4 lembar, 5 lembar, 6 lembar, dan pemasangan penuh CFRP yang menutupi seluruh permukaan balok. Setiap lembar CFRP yang digunakan memiliki lebar 150 mm. Model uji LA-1 digunakan sebagai acuan untuk dibandingkan dengan hasil pengujian laboratorium dalam analisis pemodelan balok spandrel yang diperkuat CFRP. Hasil analisis yang akan ditunjukkan pada subbab ini sebagai contoh adalah model uji LA-1 dimana hasil ini mencerminkan keseluruhan hasil balok dengan CFRP.



**Gambar 6.** Hasil Analisis Metode Elemen Hingga Model Uji LA-1 (a) Lendutan, (b) Reaksi Horizontal, (c) Reaksi Vertikal, (d) Tegangan pada Tulang, (e) Regangan pada Tulang, (f) Pola Retak

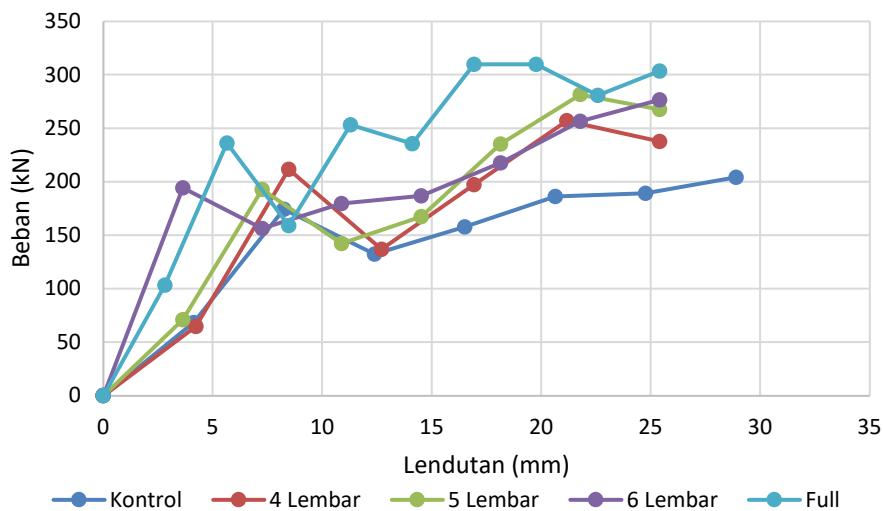
**Tabel 3.** Persentase Perbedaan Uji Lab dan Analisis Elemen Hingga Model Uji LA-1

| Model Uji | LA (Lab) | LA (Numerik) | Perbedaan (%) |
|-----------|----------|--------------|---------------|
|-----------|----------|--------------|---------------|

|                               |       |         |       |
|-------------------------------|-------|---------|-------|
| Beban (kN)                    | 260   | 276,568 | 6,327 |
| Reaksi Vertikal Maksimum (kN) | 127,3 | 138,283 | 8,628 |
| Momen Torsi (kNm)             | 52    | 55,314  | 6,327 |

Berdasarkan tabel perbandingan balok kontrol dan balok dengan CFRP, menunjukkan bahwa perbedaan antara analisis elemen hingga dan uji laboratorium sudah mendekati sehingga pemodelan dapat divariasikan dengan berbagai macam konfigurasi lembaran CFRP.

Hasil analisis yang didapatkan dengan berbagai macam konfigurasi untuk menemukan konfigurasi lembaran CFRP yang terbaik pada balok L spandrel. Setiap konfigurasi diuji untuk mengevaluasi pengaruh jumlah dan distribusi lembaran CFRP terhadap kapasitas torsi, kekakuan balok, serta perilaku retaknya.



Gambar 7. Grafik Beban terhadap Lendutan Menggunakan Analisis Elemen Hingga

Tabel 4. Persentase Peningkatan Kapasitas Torsi Balok L Spandrel

| Model Uji | Momen Torsi (kNm) | Peningkatan (%) | Keterangan             |
|-----------|-------------------|-----------------|------------------------|
| LA        | 40,833            | -               | Kontrol                |
| LA-2      | 51,396            | 25,869          | 4 Lembar CFRP          |
| LA-3      | 53,472            | 30,951          | 5 Lembar CFRP          |
| LA-1      | 55,314            | 35,461          | 6 Lembar CFRP          |
| LA-4      | 60,657            | 48,548          | Dipenuhi Lembaran CFRP |

Hasil akhir dari analisis metode elemen hingga menunjukkan bahwa pada balok yang diperkuat dengan CFRP, beban yang dapat ditahan oleh balok akan terus meningkat namun setelah kapasitas maksimum tercapai, kemampuan balok menahan beban mulai menurun secara bertahap hingga akhirnya mengalami kehancuran. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, terlihat jika peningkatan kapasitas torsi yang paling signifikan terjadi pada kondisi di mana permukaan balok spandrel sepenuhnya tertutup oleh lembaran CFRP, dengan peningkatan mencapai 49% dibandingkan dengan balok kontrol yang tidak diperkuat.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang telah dianalisa diatas, dapat disimpulkan bahwa penggunaan lembaran *Carbon Fiber Reinforced Polymer* (CFRP) secara signifikan meningkatkan performa struktural balok spandrel beton bertulang. Pemasangan CFRP mampu meningkatkan kapasitas torsi secara drastis, dengan peningkatan tertinggi sebesar 49% pada model LA-4 yang seluruh permukaannya diperkuat. Selain itu, lembaran CFRP juga terbukti efektif dalam mengurangi lendutan balok hingga 14%, yang menunjukkan peningkatan kekakuan dan ketahanan struktur terhadap deformasi.

Meskipun pola retak yang terjadi pada setiap model uji memiliki kecenderungan serupa yang diawali dari ujung balok

dan menjalar ke bagian tengah balok yang diperkuat CFRP menunjukkan ketahanan retak yang lebih baik. Hal ini mengindikasikan bahwa CFRP tidak hanya berperan sebagai elemen perkuatan terhadap torsi, tetapi juga memberikan perlindungan tambahan terhadap penyebaran kerusakan pada struktur. Secara keseluruhan, penggunaan CFRP pada balok L *spandrel* memberikan kontribusi positif terhadap peningkatan kapasitas, pengendalian lendutan, dan perbaikan perilaku retak, sehingga layak dipertimbangkan sebagai metode perkuatan yang efisien dalam rehabilitasi elemen struktur beton bertulang.

## 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*, 859-872.
- 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.
- 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).
- 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* (6<sup>th</sup> ed.). Wiley.
- 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*.
- 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*, 389-398.
- 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*, 683-696.
- 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*, 149–164.
- Wight, J. K., & MacGregor, J. K. (2012). *Reinforced concrete: Mechanics and designs* (6th ed.). Pearson.