



Analisis Perilaku Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan *Fiber Reinforced Polymer (FRP)* Berdasarkan Variasi Tinggi

^{1*} Ni Putu Silvi, ²l Putu Laintarawan

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Ngurah Rai

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Hindu Indonesia

*Corresponding author: silvi@unr.ac.id

Abstract

Structural failure due to structural design that does not meet the minimum standards according to SNI results in structural failure, one of which is cracks. The cost of strengthening that experiences cracks needs to be considered based on the type of strengthening. One of the popular strengthening for reinforced concrete beams is using FRP (Fiber Reinforced Polymer). This is because FRP has the advantages of being lightweight, easy to install, corrosion resistant and does not interfere with the function of the structure. The purpose of this study was to determine the behavior of strengthening reinforced concrete beam structures using FRP with variations in FRP strengthening height against reinforced concrete beams without strengthening. The method used in this study is a quantitative method using FRP height variation data which is modeled and analyzed using the finite element method. Modeling and analysis using SAP2000 software assistance with 5 (five) models, namely model 1 is a model without reinforcement, models 2, 3, 4 and 5 with FRP heights of 0.25h, 0.5h, 0.75h and h respectively. The FRP thickness is 5 mm. The loads calculated in the analysis are the ultimate dead and live loads according to SNI 1727: 2020 (SNI Loading) and SNI 2847: 2019 (SNI Concrete). Strengthening reinforced concrete beams with FRP can reduce vertical deflection due to the ultimate load by an average of 46.146% compared to beams without strengthening. The ultimate moment of the support and the field of the FRP-strengthened beam can increase the ultimate flexural and shear capacity by an average of 0.242% compared to beams without strengthening. Likewise, the bending stress $s_{11 \text{ min}}$ and $s_{11 \text{ max}}$ of the FRP-strengthened beam can increase the average bending stress capacity by 21.65% compared to beams without strengthening. The maximum stress and strain decrease as the FRP strengthening height increases.

Keywords: beam, deformation, shear, flexure, FRP strengthening

Abstrak

Kegagalan struktur akibat perencanaan struktur tidak sesuai standar minimal menurut SNI mengakibatkan kegagalan struktur seperti retak-retak. Biaya perkuatan retak perlu dipertimbangkan berdasarkan jenis perkuatan. Salah satu perkuatan yang populer untuk perkuatan balok beton bertulang adalah perkuatan dengan FRP (Fiber Reinforced Polymer). Hal ini disebabkan FRP memiliki keunggulan yaitu ringan, mudah dipasang, tahan korosi dan tidak mengganggu fungsi struktur. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku perkuatan struktur balok beton bertulang menggunakan FRP dengan variasi tinggi perkuatan FRP terhadap balok beton bertulang tanpa perkuatan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif menggunakan data variasi tinggi FRP yang dimodel dan dianalisis menggunakan finite element method. Pemodelan dan analisis menggunakan bantuan software SAP2000 dengan 5 (lima) buah model yaitu model 1 adalah model tanpa perkuatan, model 2, 3, 4 dan 5 dengan tinggi FRP masing-masing sebesar 0.25h, 0.5h, 0.75h dan h. Tebal FRP adalah 5 mm. Beban yang diperhitungkan dalam analisis adalah beban mati dan hidup ultimit sesuai SNI 1727: 2020 (SNI Pembebanan) dan SNI 2847:2019 (SNI Beton). Perkuatan balok beton bertulang dengan FRP dapat mereduksi lendutan vertikal akibat beban ultimit rata-rata sebesar 46.146% terhadap balok tanpa perkuatan. Momen ultimit tumpuan dan lapangan balok perkuatan dengan FRP dapat meningkatkan kapasitas lentur ultimit dan geser rata-rata sebesar 0.242% terhadap balok tanpa perkuatan. Demikian juga tegangan lentur $s_{11 \text{ min}}$ dan $s_{11 \text{ max}}$ balok perkuatan dengan FRP dapat meningkatkan kapasitas tegangan lentur rata-rata sebesar 21.65% terhadap balok tanpa perkuatan. Tegangan dan regangan maksimum semakin menurun seiring meningkatnya tinggi perkuatan FRP.

Kata kunci: balok, deformasi, geser, lentur, perkuatan FRP

Informasi Artikel

Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025

1. Pendahuluan

Pada struktur bangunan beton bertulang eksisting atau struktur bangunan yang baru dibangun, saat difungsikan berpotensi memiliki permasalahan pada komponen struktur. Permasalahan tersebut berupa kegagalan dan kerusakan pada struktur akibat ketidaksesuaian dalam perencanaan dan pelaksanaan, perubahan fungsi ruang, Kegagalan komponen struktur beton bertulang dengan tingkat kerusakan tidak signifikan dapat dilakukan perkuatan komponen struktur yaitu melakukan perkuatan struktur dengan berbagai tipe perkuatan.

Dengan adanya tuntutan bahwa bangunan yang mengalami kerusakan harus sudah dapat secepatnya difungsikan kembali, maka perlu adanya penanganan terhadap kerusakan yang terjadi dengan melakukan perkuatan. Kegagalan struktur dapat berupa retak-retak pada komponen struktur seperti pada balok dan kolom serta pada komponen struktur lainnya. Hal ini umumnya terjadi pada bangunan yang telah berdiri. Biaya perbaikan pada balok beton bertulang yang mengalami retak perlu dipertimbangkan berdasarkan jenis perkuatan yang akan dilakukan. Salah satu perkuatan yang populer untuk perkuatan balok beton bertulang adalah menggunakan lembaran FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Hal ini disebabkan FRP memiliki keunggulan yaitu ringan, mudah dipasang, tahan korosi dan tidak mengganggu fungsi struktur.

Beberapa penelitian terdahulu tentang perkuatan struktur antara lain: [1] yaitu membandingkan efektivitas kekuatan lentur dan kinerja dua metode perkuatan balok beton

bertulang menggunakan FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), yaitu lembaran FRP dipasang secara eksternal dan batang FRP yang dipasang dekat permukaan. Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimen. Kekuatan lentur, deformasi dan mode kegagalan lembaran FRP lebih baik dibandingkan batang FRP. [2] Meneliti penggunaan komposit FRP untuk memperkuat balok beton bertulang, baik dalam hal kekuatan lentur maupun geser. Metode yang digunakan adalah tinjauan literatur. Hasil analisis menunjukkan CFRP dapat meningkatkan kapasitas lentur dan geser. [3] Menganalisis perkuatan join balok kolom menggunakan CRFP. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen. Hasil penelitian menghasilkan sambungan menggunakan CRFP dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser dan memperbaiki mode kegagalan join balok kolom. [4] Melakukan studi tentang kapasitas deformasi balok beton yang diperkuat dengan batang FRP untuk peningkatan kekuatan geser. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen. Hasil analisis menunjukkan batang FRP dapat meningkatkan kapasitas geser dan deformasi serta memperbaiki distribusi beban. [5] Mengevaluasi efektivitas penggunaan FRP untuk memperkuat balok beton bertulang yang memiliki tulangan korosi. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen. Hasil analisis menunjukkan FRP dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser dan meningkatkan kapasitas beban. [6] menganalisis perilaku lentur balok beton bertulang yang diperkuat menggunakan FRP. Metode yang digunakan adalah metode

Informasi Artikel

Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025

ekperimen. Hasil analisis yaitu dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser dan meningkatkan kapasitas beban yang lebih besar, dapat mengurangi lendutan dan dapat mengontrol retak menjadi lebih baik. [7] Menganalisis efektivitas perkuatan CFRP untuk meningkatkan kapasitas geser balok beton bertulang. Metode yang digunakan adalah metode eksperimen. Hasil analisis menunjukkan bahwa perkuatan CRFP memberikan kontribusi dapat meningkatkan kapasitas geser dan lentur serta mampu membantu dalam pengendalian retak. Dari semua penelitian-penelitian sebelumnya belum menganalisis perilaku akibat perubahan dimensi FRP terhadap lentur dan geser.

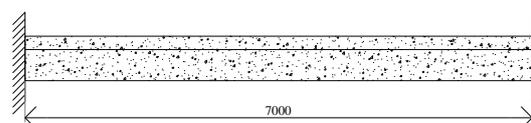
Berdasarkan beberapa hasil penelitian terdahulu, maka dalam penelitian ini terdapat gap dengan penelitian-penelitian sebelumnya yaitu belum mempertimbangkan pengaruh perubahan dimensi FRP atau variasi tinggi FRP, sehingga dalam penelitian ini akan menganalisis perilaku perkuatan balok beton bertulang menggunakan FRP dengan memvariasikan tinggi perkuatan FRP. Penelitian ini sangat penting dilakukan untuk mengoptimalkan dimensi FRP sehingga menjadi lebih ekonomis dan kuat.

2. Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode penelitian kuantitatif dengan metode finite element menggunakan software. Pemodelan, analisis dan validasi model struktur dilakukan secara 3D menggunakan software SAP2000 dengan model geometri dan model beban. Struktur ini adalah balok T beton bertulang dengan bentang 7 m dengan

jarak antar portal diasumsikan 5 m (Gambar 1). Dimensi balok T ini adalah lebar atas 500 mm, tinggi 500 mm, tebal badan atau lebar bawah = 250 mm. Beban-beban yang diperhitungkan dalam analisis adalah beban mati dan beban hidup ultimat. Beban mati dihitung langsung software. Beban mati tambahan: berat spesi, tegel, plafond, MEP = 150 kg/m², beban hidup hidup lantai = 200 kg/m². Beban mati tambahan untuk balok frame = 750 kg/m dan beban hidup untuk balok frame = 1000 kg/m. Kombinasi beban yang diperhitungkan dalam analisis ini antara lain: $U1 = 1.4D$, $U2 = 1.2D+1.6L$ [8].

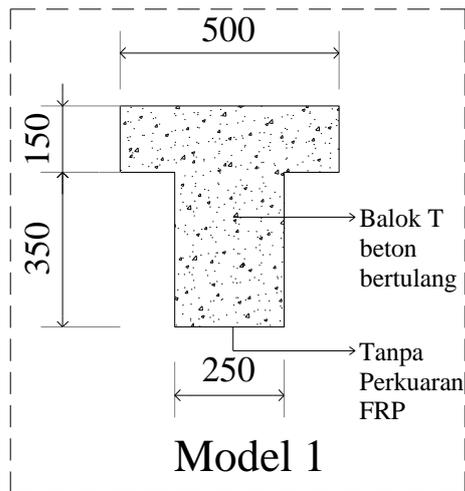
Dalam analisis ini dibuat 5 (lima) buah model yaitu model 1 (tanpa perkuatan) (Gambar 2), model 2 (tinggi FRP = 0.25h) (Gambar 3), model 3 (tinggi FRP = 0.5h) (Gambar 4), model 4 (tinggi FRP = 0.75h) (Gambar 5) dan model 5 (tinggi FRP = h) (Gambar 6), dimana h adalah tinggi balok di bawah pelat lantai (Gambar 1a). Properties material beton bertulang, mutu beton 21 MPa, mutu baja tulangan longitudinal BjTS 420 ($f_y = 420$ MPa, $f_u = 525$ MPa), mutu baja tulangan geser BjTP 280 ($f_y = 280$ MPa, $f_u = 380$ MPa), berat volume beton bertulang = 2400 kg/m³. Modulus elastisitas beton = $4700 \sqrt{f_c}$ MPa. Modulus elastisitas baja tulangan = 200000 MPa. Poisson ratio (ν) beton = 0.2 [9]. Properties material untuk lembaran FRP adalah sebagai berikut: $E = 146$ GPa, $f_{yt} = 1875$ MPa, $\nu = 0.22$, berat volume = 1800 kg/m³ [1].



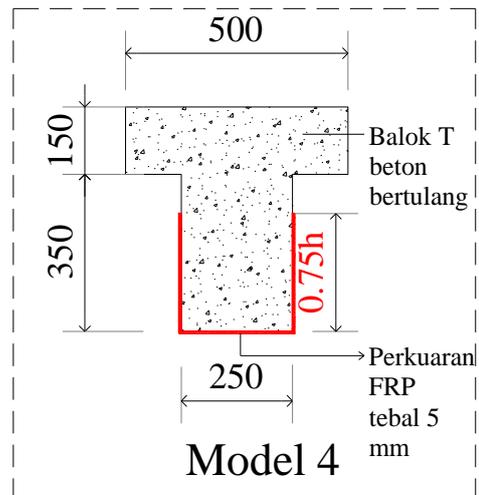
Gambar 1. Model geometri penampang balok

Informasi Artikel

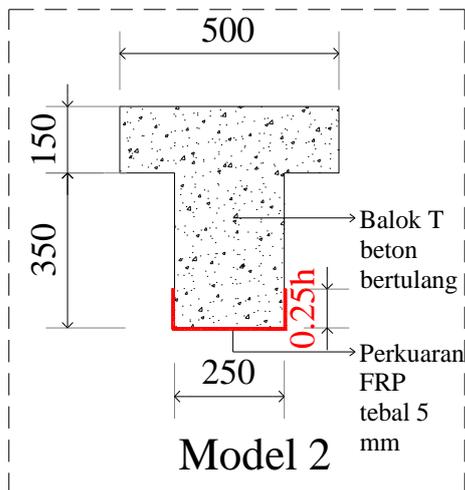
Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025



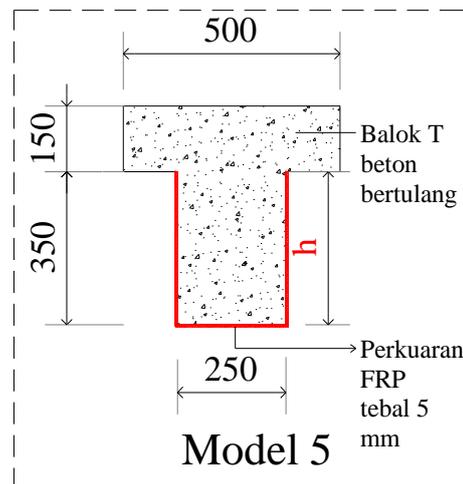
Gambar 2. Model 1 penampang tanpa perkuatan FRP



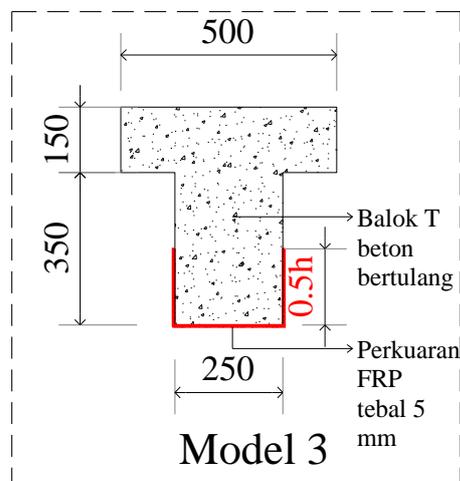
Gambar 5. Model 4 penampang dengan perkuatan FRP (tinggi FRP = $0.75h$)



Gambar 3. Model 2 penampang dengan perkuatan FRP (tinggi FRP = $0.25h$)



Gambar 6. Model 5 penampang dengan perkuatan FRP (tinggi FRP = h)

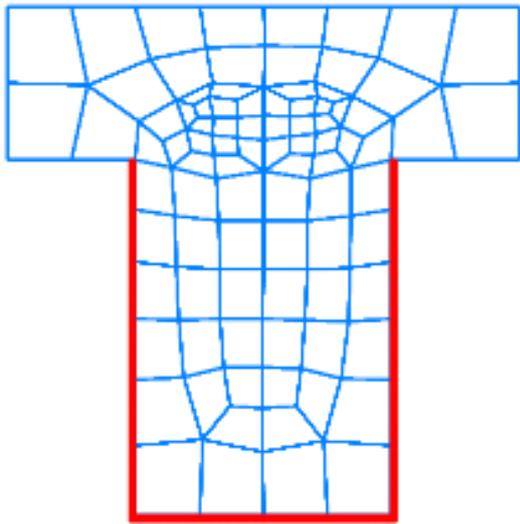


Gambar 4. Model 3 penampang dengan perkuatan FRP (tinggi FRP = $0.50h$)

Gambar 7 adalah model meshing untuk model finite element balok T. Meshing untuk membagi kontinum menjadi bagian yang lebih kecil untuk peningkatan akurasi hasil, untuk mengatasi struktur kompleks, informasi lebih detail tegangan dan regangan serta menjadi solusi numerik yang lebih baik [10]. Model meshing ini untuk diskontinu tegangan dan regangan pada suatu titik penampang, sehingga tegangan dan regangan suatu titik menjadi akurat.

Informasi Artikel

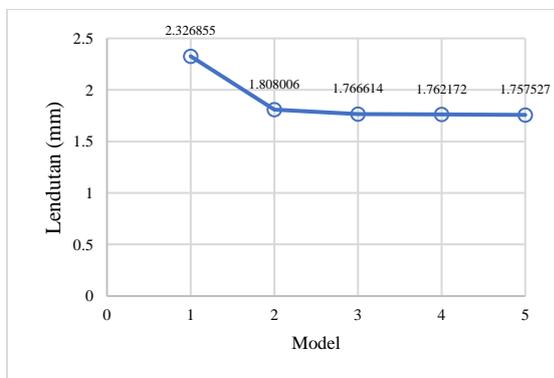
Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025



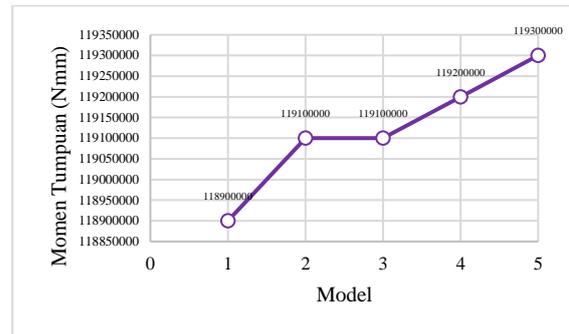
Gambar 7. Model Finite Element Balok Perkuatan

3. Hasil Pembahasan

Parameter perilaku perkuatan dalam penelitian ini adalah lendutan, momen, gaya geser dan tegangan lentur balok beton bertulang. Dari hasil analisis, lendutan balok dengan perkuatan FRP 0.25h, 0.5h, 0.75h dan h menghasilkan lendutan lebih kecil masing-masing sebesar 52.103%, 44.949%, 44.172% dan 43.359% terhadap balok tanpa perkuatan FRP (Gambar 8). Lendutan ini masih lebih kecil dari lendutan ijin $L/240$ (29.1 mm). Dengan demikian, perkuatan FRP pada balok T beton bertulang memberikan ketahanan terhadap lendutan lebih baik.

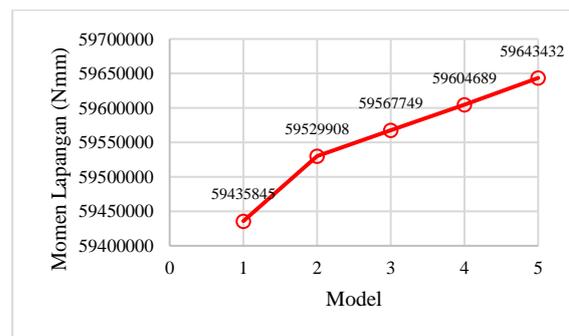


Gambar 8. Lendutan ultimit tengah bentang balok



Gambar 9. Momen ultimit tumpuan balok

Gambar 9 adalah momen ultimit tumpuan pada balok beton bertulang dengan dan tanpa perkuatan FRP. Hasil analisis menunjukkan bahwa momen ultimit tumpuan pada balok dengan perkuatan FRP 0.25h, 0.5h, 0.75h dan h menghasilkan momen ultimit tumpuan lebih besar masing-masing sebesar 0.168%, 0.168%, 0.252% dan 0.335% terhadap balok tanpa perkuatan FRP. Dengan demikian, perkuatan FRP pada balok T beton bertulang memberikan ketahanan terhadap lentur pada daerah tumpuan balok.



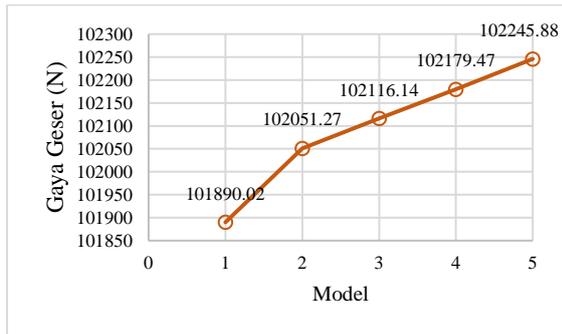
Gambar 10. Momen ultimit lapangan balok

Gambar 10 adalah momen ultimit lapangan pada balok beton bertulang dengan dan tanpa perkuatan FRP. Hasil analisis menunjukkan bahwa momen ultimit tumpuan pada balok dengan perkuatan FRP 0.25h, 0.5h, 0.75h dan h menghasilkan momen

Informasi Artikel

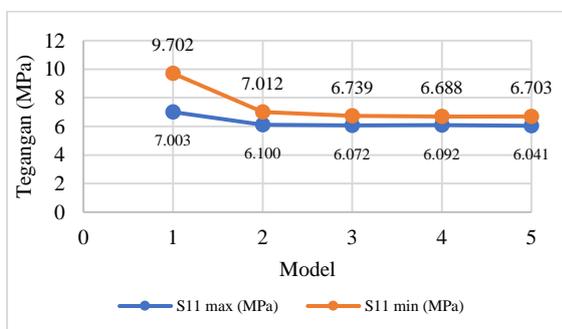
Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025

ultimit tumpuan lebih besar masing-masing sebesar 0.158%, 0.221%, 0.283% dan 0.348% terhadap balok tanpa perkuatan FRP. Dengan demikian, perkuatan FRP pada balok T beton bertulang memberikan ketahanan terhadap lentur pada daerah lapangan balok.



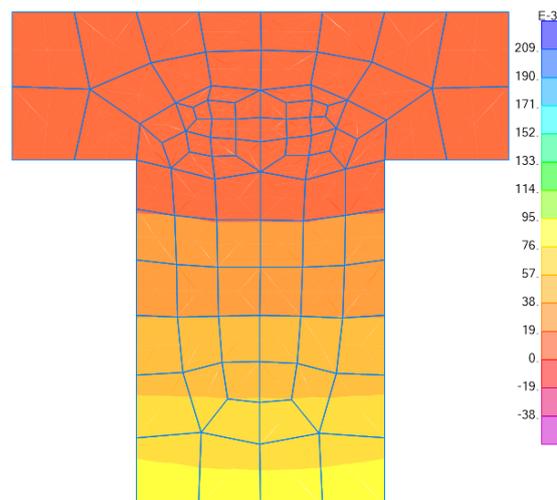
Gambar 11. Gaya geser ultimit balok

Gambar 11 adalah gaya geser ultimit pada balok beton bertulang dengan dan tanpa perkuatan FRP. Hasil analisis menunjukkan bahwa gaya geser ultimit balok dengan perkuatan FRP 0.25h, 0.5h, 0.75h dan h menghasilkan gaya geser ultimit lebih besar masing-masing sebesar 0.158%, 0.221%, 0.283% dan 0.348% terhadap balok tanpa perkuatan FRP. Dengan demikian, perkuatan FRP pada balok T beton bertulang memberikan ketahanan terhadap geser pada daerah tumpuan balok.



Gambar 12. Tegangan lentur S11 max dan S11 min balok

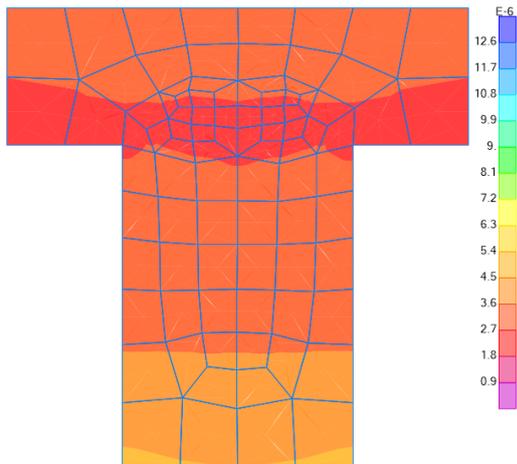
Gambar 12 adalah tegangan lentur s11 max dan s11 min pada balok beton bertulang dengan dan tanpa perkuatan FRP. Hasil analisis menunjukkan bahwa tegangan lentur balok S11 max balok dengan perkuatan FRP 0.25h, 0.5h, 0.75h dan h menghasilkan tegangan lentur S11 max lebih besar masing-masing sebesar 12.89%, 13.29%, 13.01% dan 13.74% terhadap balok tanpa perkuatan FRP. Sedangkan tegangan lentur balok S11 min balok dengan perkuatan FRP 0.25h, 0.5h, 0.75h dan h menghasilkan tegangan lentur S11 min lebih besar masing-masing sebesar 27.73%, 30.54%, 31.07% dan 30.91% terhadap balok tanpa perkuatan FRP. Dengan demikian, perkuatan FRP pada balok T beton bertulang memberikan ketahanan terhadap tegangan lentur balok. Tegangan lentur balok T komposit akan memberikan tegangan tekan pada beton dan tegangan tarik pada baja tulangan, dimana FRP akan memberikan kontribusi terhadap tahanan lentur struktur balok.



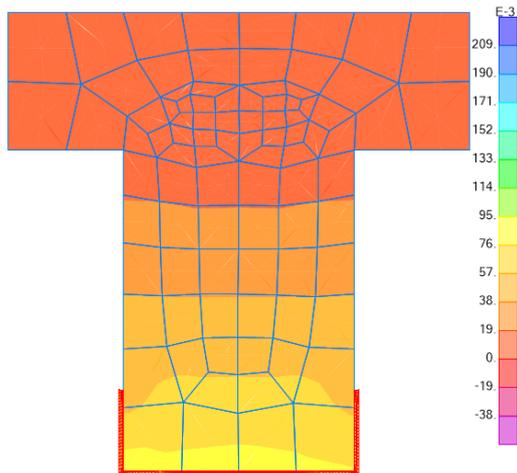
Gambar 13. Kontur tegangan utama Smax (a) model 1 (MPa)

Informasi Artikel

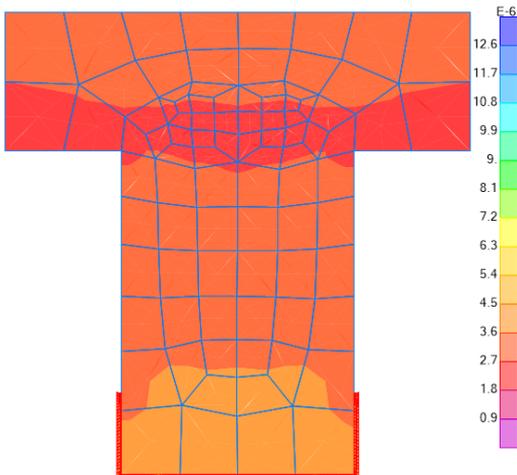
Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025



Gambar 14. Kontur regangan utama Emax (b) model 1 (MPa)

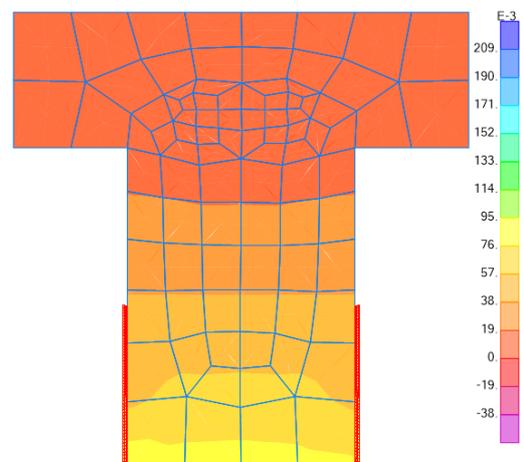


Gambar 15. Kontur tegangan utama model 2 (MPa)



Gambar 16. Kontur regangan utama Emax (b) model 2 (MPa)

regangan utama Emax balok terlihat bahwa tegangan dan regangan utama pada serat bawah penampang balok mengalami kontur tegangan tarik, dimana semakin tinggi perkuatan FRP, maka tegangan tarik serat bawah balok akan semakin menurun. Hal ini disebabkan karena semakin besar luas bidang perkuatan FRP maka akan memiliki ketahanan semakin besar. Demikian juga tegangan dan regangan utama pada serat serat lainnya juga mengalami kontur tegangan tarik, dimana semakin tinggi perkuatan FRP, maka tegangan tarik akan semakin menurun. Namun ada pada titik tertentu mengalami tegangan dan regangan utama maksimum tertekan. Pada kontur tegangan dan regangan balok T dengan variasi perkuatan FRP, secara umum serat atas akan mengalami tegangan dan regangan tekan dan serta bawah akan mengalami tegangan dan regangan tarik pada daerah tengah bentang balok, sedangkan pada daerah tumpuan akan mengalami tegangan dan regangan sebaliknya.

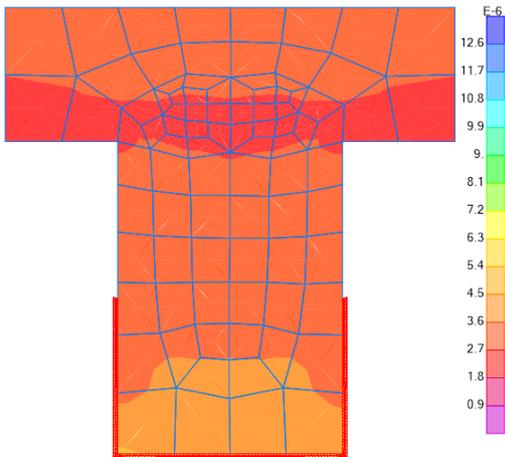


Gambar 17. Kontur tegangan utama Smax (a) model 3 (MPa)

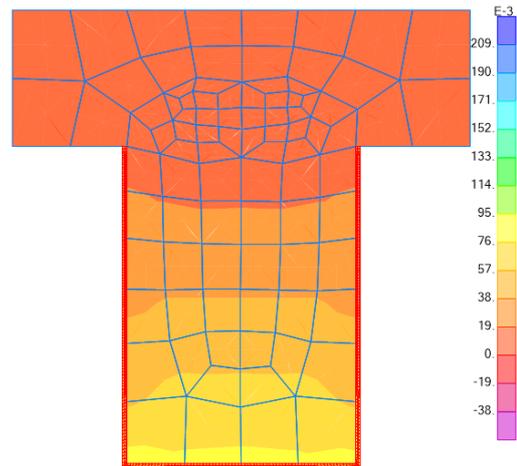
Gambar 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 adalah kontur tegangan utama max dan

Informasi Artikel

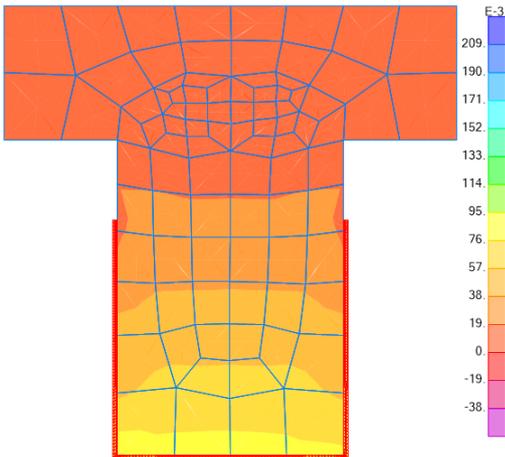
Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025



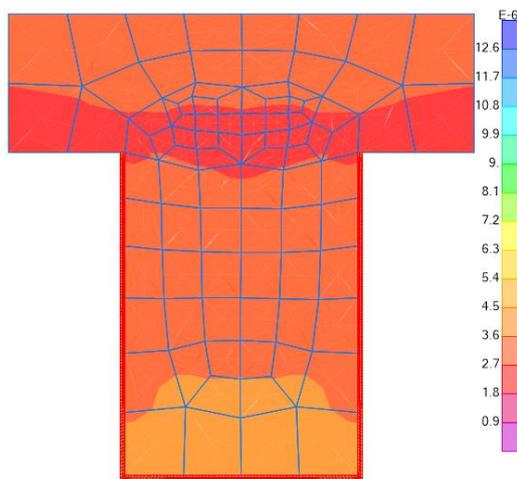
Gambar 18. Kontur regangan utama Emax (b) model 3 (MPa)



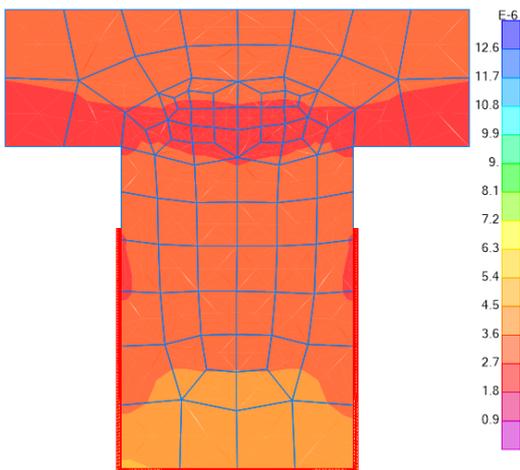
Gambar 21. Kontur tegangan utama Smax (a) model 5 (MPa)



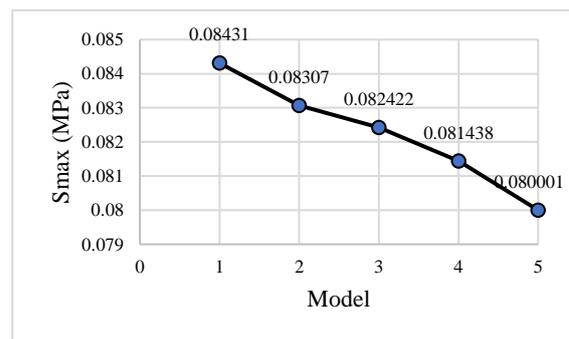
Gambar 19. Kontur tegangan utama Smax model 4 (MPa)



Gambar 22. Kontur regangan utama Emax (b) model 5 (MPa)



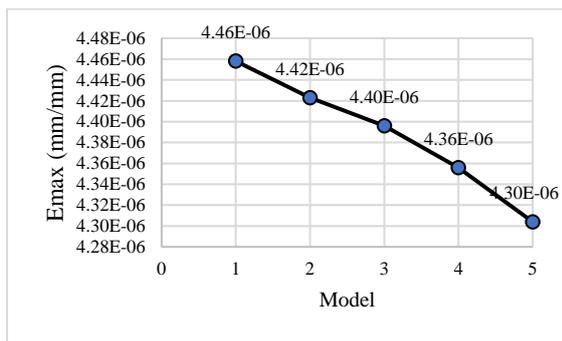
Gambar 20. Kontur regangan utama Emax (b) model 4 (MPa)



Gambar 23. Tegangan utama Smax pada serat bawah balok (MPa)

Informasi Artikel

Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025



Gambar 24. Regangan utama Emax pada serat bawah balok (MPa)

Gambar 23 adalah tegangan utama Smax pada suatu titik tengah serta bawah balok, terlihat bahwa tegangan utama pada titik ini mengalami tegangan tarik semakin menurun seiring meningkatnya tinggi perkuatan FRP.

Gambar 24 adalah regangan utama Emax pada suatu titik tengah serta bawah balok, terlihat bahwa regangan utama pada titik ini mengalami regangan tarik semakin menurun seiring meningkatnya tinggi perkuatan FRP.

Penurunan tegangan utama maksimum untuk model 2,3,4,5 masing-masing sebesar 1.48%, 2.24%, 3.41%, 5.11% terhadap model tanpa perkuatan. Penurunan regangan utama maksimum untuk model 2,3,4,5 masing-masing sebesar -0.79%, 1.39%, 2.29%, 4.45% terhadap model 1 atau model tanpa perkuatan.

Hasil-hasil penelitian sebelumnya tentang perkuatan balok menggunakan FRP menyatakan bahwa penambahan perkuatan FRP akan meningkatkan kapasitas lentur, geser dan memperkecil lendutan berdasarkan beban-beban batas yang bekerja. Hasil penelitian ini juga sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yaitu juga meningkatkan kapasitas lentur, geser dan memperkecil lendutan berdasarkan

beban-beban batas yang bekerja. Model yang menghasilkan efiseinsi optimum adalah model 2, karena dengan dimensi FRP kecil dapat menghasilkan kapasitas lentur dan geser yang besar, sehingga material FRP menjadi ekonomis. Namun demikian, tinggi perkuatan FRP juga tergantung dari besarnya beban-beban ultimit yang bekerja pada struktur balok tersebut.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik, tidak adanya validasi eksperimental dalam penelitian ini, maka perkuatan balok beton bertulang dengan FRP dapat mereduksi lendutan vertikal akibat beban ultimit rata-rata sebesar 46.146% terhadap balok tanpa perkuatan. Momen ultimit tumpuan dan lapangan balok perkuatan dengan FRP dapat meningkatkan kapasitas lentur ultimit dan geser rata-rata sebesar 0.242% terhadap balok tanpa perkuatan. Tegangan lentur s11 min dan s11 max balok perkuatan dengan FRP dapat meningkatkan kapasitas tegangan lentur rata-rata sebesar 21.65% terhadap balok tanpa perkuatan. Tegangan dan regangan utama maksimum yang terjadi akibat penambahan perkuatan FRP akan semakin menurun

Adapun saran dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: dapat dilanjutkan pada model struktur balok kantilever bentang pendek maupun bentang panjang, pada struktur balok nonprismatis dan memvariasikan lebar dan tinggi FRP. Dapat juga dilanjutkan dengan model perkuatan yang lainnya.

Informasi Artikel

Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025

Daftar Rujukan

- [1] M. Panahi, S. A. Zareei, and A. Izadi, "Flexural strengthening of reinforced concrete beams through externally bonded FRP sheets and near surface mounted FRP bars," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, no. June, p. e00601, 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00601.
- [2] M. K. Askar, A. F. Hassan, and Y. S. S. Al-Kamaki, "Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, no. May, p. e01189, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01189.
- [3] E. Goliias, F. H. Schlüter, and P. Spyridis, "Strengthening of reinforced concrete beam-column joints by means of fastened C-FRP ropes," *Structures*, vol. 66, no. April, p. 106811, 2024, doi: 10.1016/j.istruc.2024.106811.
- [4] C. T. N. Tran, X. H. Nguyen, D. D. Le, and H. C. Nguyen, "Deformation capacity of shear-strengthened concrete beams reinforced with FRP bars: Experimental and analytical investigations," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, no. May, p. e01411, 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01411.
- [5] J. Yang, R. Haghani, T. Blanksvärd, and K. Lundgren, "Experimental study of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 301, p. 124076, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124076.
- [6] J. Dinesh Kumar, A. Sattainathan Sharma, and K. Suganya Devi, "Study on flexural behaviour of RC beam strengthened with FRP," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 2040, no. 1, pp. 0–12, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/2040/1/012019.
- [7] H. H. Mhanna, R. A. Hawileh, and J. A. Abdalla, "Shear strengthening of reinforced concrete beams using CFRP wraps," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 17, pp. 214–221, 2019, doi: 10.1016/j.prostr.2019.08.029.
- [8] BSN, SNI 1727: 2020, *Beban Desain Minimum dan Kriteria Terkait untuk Bangunan Gedung dan Struktur Lain*. 2020.
- [9] BSN, SNI 2847:2019, *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan*

Penjelasan. 2019.

- [10] D. L. Logan, *A first course in the finite element method*, vol. 3, no. 2. 1987. doi: 10.1016/0168-874x(87)90008-4.

Informasi Artikel

Diterima Redaksi: 27-01-2025 | Selesai Revisi: 29-04-2025 | Diterbitkan Online: 29-04-2025