

Analisis Elemen Hingga pada Balok Beton Bertulang dengan Perkuatan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*) Menggunakan *Software*

Ridho Surahman¹⁾

Mohd. Isneini²⁾

Fikri Alami³⁾

Abstract

In testing reinforced concrete beams strengthened with 4 layers of GFRP can increase the maximum load up to 112% (Nalarita, 2019). The test can be done by modeling using finite element based software.

The beam that is modeled has a dimension of 1,7 m long, 15 cm wide and 15 cm high with 4 layers of 1,3 mm/layer GFRP. The beams that are modeled are only a quarter section because of symmetrical geometry and loading.

The percentage difference between the results of modeling and experimental tests on normal beams is 1,49% for deflection in the middle span. The crack that occurs in normal beams in modeling and experimental shows the same crack pattern, which is flexural crack. The percentage difference between modeling and experimental tests on the strengthened beam is 21,81% for the deflection in the middle span. In experimental and modeling tests, the applied GFRP undergoes debonding before the concrete compressive strain reaches its ultimate strain.

Keywords: Concrete, GFRP, debonding, modeling

Abstrak

Dalam pengujian balok beton bertulang yang diperkuat dengan 4 lapis GFRP mampu meningkatkan beban maksimum mencapai 112% (Nalarita, 2019). Pengujian tersebut dapat dilakukan dengan melakukan pemodelan menggunakan *software* berbasis elemen hingga.

Balok yang dimodelkan mempunyai dimensi panjang 1,7 m, lebar 15 cm dan tinggi sebesar 15 cm dengan 4 lapis GFRP setebal 1,3 mm/lapis. Balok yang dimodelkan hanya seperempat bagian karena geometri dan pembebanan simetris.

Persentase selisih hasil antara pemodelan dan uji eksperimental pada balok normal adalah 1,49% untuk lendutan di tengah bentang. Pola retak yang terjadi pada balok normal dalam pemodelan dan eksperimental menunjukkan pola retak yang sama yaitu retak lentur. Persentase selisih hasil antara pemodelan dan uji eksperimental pada balok perkuatan adalah 21,81% untuk lendutan di tengah bentang. Dalam uji eksperimental dan pemodelan, GFRP yang diaplikasikan mengalami *debonding* sebelum regangan tekan beton mencapai regangan ultimitnya.

Kata kunci : Beton, GFRP, *debonding*, pemodelan

¹⁾ Mahasiswa pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Surel: ridhosurahman@gmail.com

²⁾ Staf pengajar pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Jalan. Prof. Sumantri Brojonegoro 1. Gedong Meneng Bandar Lampung. 35145. Surel:

³⁾ Staf pengajar pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Jalan Prof. Sumantri Brojonegoro 1. Gedong Meneng Bandar Lampung. 35145. Surel:

1. PENDAHULUAN

Salah satu metode perkuatan struktur adalah dengan menggunakan perkuatan GFRP (*Glass Fiber Reinforced Polymer*). Metode perkuatan ini diaplikasikan bersama dengan lem perekat *epoxy*. Saat ini GFRP telah menjadi populer dan banyak digunakan dalam industri konstruksi dalam bentuk lembaran atau pelat untuk memperkuat struktur.

Pada penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Nalarita (2019), pengujian balok beton bertulang dengan perkuatan menggunakan 4 lapis GFRP dapat meningkatkan kuat lentur balok hingga 112%. Namun dengan kemajuan teknologi, studi eksperimental tersebut dapat dilakukan tanpa melakukan pengujian di laboratorium melainkan dengan memodelkan balok beton bertulang tersebut menggunakan *software*.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Balok Beton Bertulang

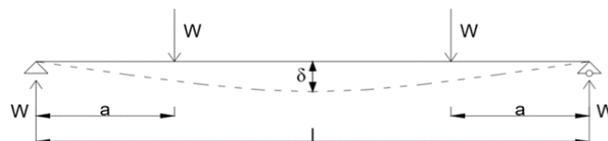
Balok beton bertulang adalah bagian dari struktur yang sangat sering digunakan dalam dunia konstruksi yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari pelat menuju kolom. Dalam pelaksanaannya, biasanya balok dicetak secara monolit bersama dengan pelat lantai. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Rada (2018), balok beton bertulang yang dikenai gaya lentur dan gaya geser dapat dimodelkan menggunakan *software* berbasis elemen hingga. Hasil dari pemodelan menunjukkan hasil yang tidak jauh berbeda dengan hasil eksperimental.

2.2. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) merupakan material bahan konstruksi yang terus dikembangkan oleh sebagian kalangan. Walaupun harganya cukup mahal, namun banyak kelebihan yang dimiliki oleh bahan ini yaitu tahan korosi, memiliki kekuatan tinggi dan bobotnya ringan (Widyaningsih, 2016). Selain itu, keuntungan lainnya dari penggunaan GFRP adalah memiliki reaksi terhadap kimia yang tinggi, berat jenis relatif tinggi dan sensitif terhadap abrasi (Gangarao dkk, 2006).

2.3. Lendutan

Lendutan pada struktur terjadi akibat beban yang bekerja pada struktur tersebut. Struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup agar lendutan yang terjadi tidak melebihi batas yang diperbolehkan sehingga kemampuan struktur untuk melayani beban yang bekerja tidak menurun.



Gambar 1. Lendutan maksimum di tengah bentang.

Lendutan maksimum pada balok yang ditumpu sederhana dengan dua beban terpusat dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$\delta = \frac{Wa}{24EI} \cdot (3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$

dimana δ adalah lendutan, W adalah beban, a adalah jarak dari tumpuan ke beban, E adalah modulus elastisitas, I adalah inersia balok dan l adalah panjang balok.

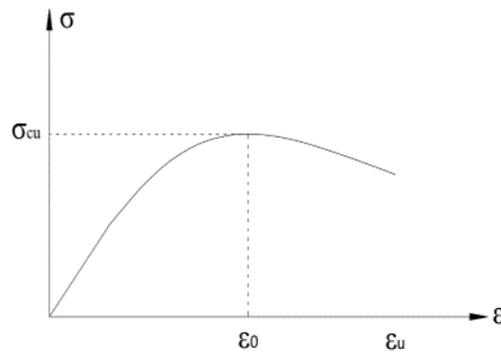
2.4. Pola Retak

Retak adalah salah satu jenis kerusakan yang sering terjadi pada beton. Retak pada beton dapat diketahui dengan melihat secara visual yaitu nampak seperti garis. Retak pada beton dapat terjadi baik sebelum atau sesudah beton mengeras. Ada tujuh jenis keretakan yang dapat terjadi pada struktur balok beton bertulang yaitu *flexural crack*, *shear crack*, *torsion crack*, *corrosion crack*, *shrinkage crack*, *sliding crack* dan *tension crack*.

2.5. Konstitutif Material

2.5.1. Beton

Kurva tegangan-regangan tekan pada beton didapatkan menggunakan metode numerik yang telah diverifikasi secara eksperimental oleh Saenz (1964),



Gambar 2. Kurva tegangan-regangan tekan beton. (Saenz, 1964)

$$\sigma_c = \frac{E_c \cdot \varepsilon_c}{1 + (R + R_E - 2) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right) - (2R - 1) \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^2 + R \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}\right)^3} \quad (2)$$

dimana σ_c adalah tegangan tekan beton, $E_c = 4700f'c^{0.5}$, $E_0 = f'c/\varepsilon_0$, $\varepsilon_0 = 0,002$, $R_E = E_c/E_0$, $R_\varepsilon = 4$ dan $R_\sigma = 4$.

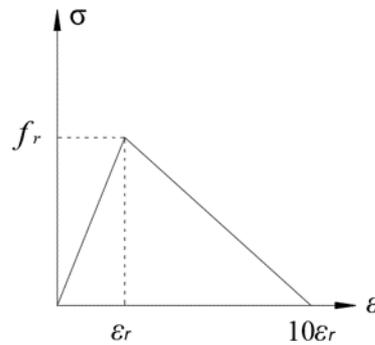
Parameter kerusakan akibat tekan pada beton yaitu hubungan antara *damage factor* (d_c) dan *inelastic strain* adalah sebagai berikut,

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (3)$$

$$\varepsilon^{inelastic} = \varepsilon_c - \varepsilon^{elastic} \quad (4)$$

dimana $\varepsilon^{elastic}$ adalah regangan elastis beton yang diambil sebesar $0,4f'_c/E_c$.

Perilaku beton pada kondisi tarik setelah retak dapat disimulasikan dalam beberapa bentuk, di antaranya adalah membentuk kurva bilinear dan eksponensial. Kurva yang digunakan pada penelitian ini adalah berbentuk bilinear.



Gambar 3. Kurva tegangan-regangan tarik beton.

$$f_r = 0,62 \sqrt{(f'_c)} \quad (5)$$

$$\epsilon_r = \frac{f_r}{E_c} \quad (6)$$

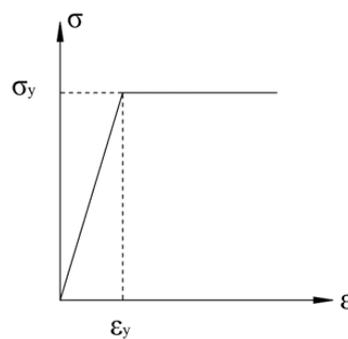
Parameter kerusakan akibat tarik pada beton yaitu hubungan antara *damage factor* (d_i) dan *inelastic strain* adalah sebagai berikut,

$$d_i = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{tu}} \quad (7)$$

$$\epsilon^{inelastic} = \epsilon_c - \epsilon^{elastic} \quad (8)$$

2.5.2. Baja

Dalam memodelkan baja tulangan menurut Günel (1995), dapat mengadopsi dari model *elasto-plastic* yang disajikan sebagai berikut,



Gambar 4. Kurva tegangan regangan model *elasto-plastic*.

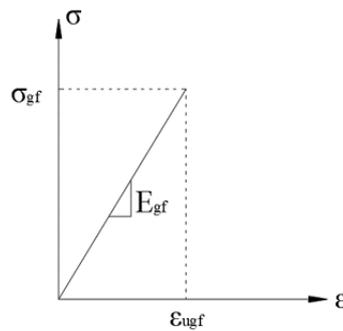
Dari kurva di atas dapat diekspresikan secara matematis dalam persamaan berikut,

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_s} \quad (9)$$

dimana ε_y adalah regangan leleh, σ_y adalah tegangan leleh dan E_s adalah modulus elastisitas baja.

2.5.3. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)

Hubungan tegangan-regangan pada pelat GFRP berbentuk linear hingga mencapai tegangan puncaknya.



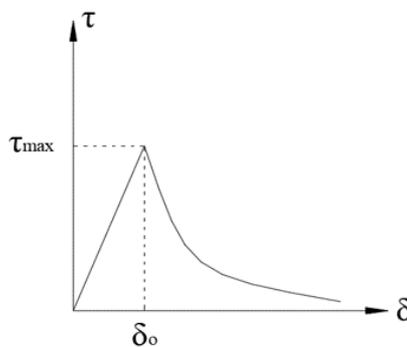
Gambar 5. Kurva tegangan-regangan ideal GFRP.

Kurva tersebut dapat dituliskan ke dalam persamaan sebagai berikut,

$$\sigma_{gf} = E_{gf} \cdot \varepsilon \quad (10)$$

2.5.4. Epoxy Resin

Salah satu model hubungan tegangan rekatan-slip yang paling akurat yang dapat digunakan dalam analisis elemen hingga adalah model yang disarankan oleh Lu, dkk (2005).



Gambar 6. Kurva *bond-slip* epoxy. (Lu, dkk., 2005)

untuk $\delta \leq \delta_0$ tegangan geser dihitung menggunakan persamaan (11), sedangkan untuk $\delta > \delta_0$ tegangan geser dihitung menggunakan persamaan (12).

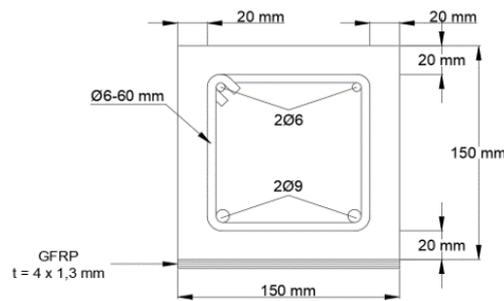
$$\tau = \tau_{max} \frac{\delta}{\delta_0} \tag{11}$$

$$\tau = \tau_{max} \cdot e^{(-\alpha \cdot (\frac{\delta}{\delta_0}) - 1)} \tag{12}$$

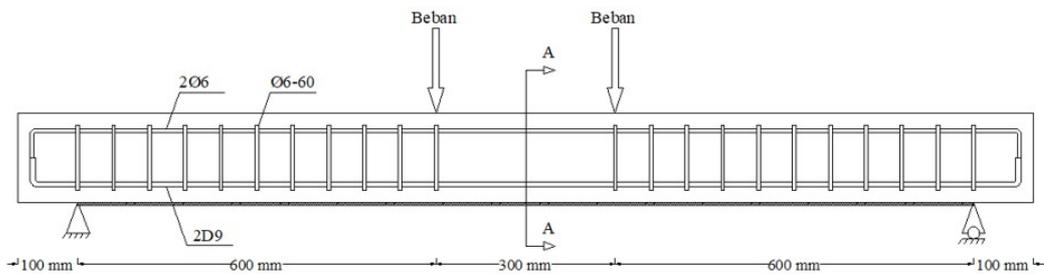
3. METODE PENELITIAN

3.1. Benda Uji

Penelitian ini memodelkan dua buah balok beton bertulang. Balok pertama merupakan balok normal, sedangkan balok kedua adalah balok yang diperkuat dengan 4 lapis GFRP dengan tebal 1,3 mm/lapis. Dimensi balok beton bertulang yang digunakan adalah berukuran 15 cm x 15 cm x 170 cm.



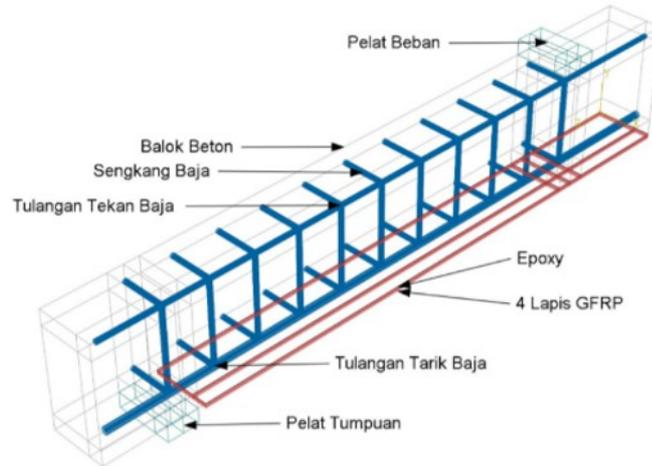
Gambar 7. Potongan melintang balok perkuatan.



Gambar 8. Potongan memanjang balok perkuatan.

3.2. Pemodelan Desain

Balok beton bertulang tanpa perkuatan GFRP maupun dengan perkuatan GFRP dimodelkan hanya seperempat bagiannya saja. Tujuannya adalah untuk memperkecil ukuran dan mempersingkat waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan model yang telah dibuat. Hal ini dikarenakan jumlah *degree of freedom* (DOF) yang ada di dalam model menjadi lebih sedikit.



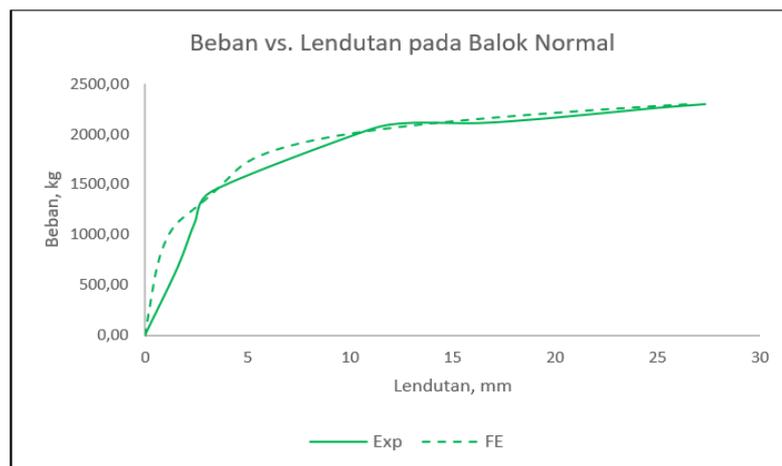
Gambar 9. Seperempat balok yang dimodelkan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Balok Normal

4.1.1. Hubungan Beban dan Lendutan

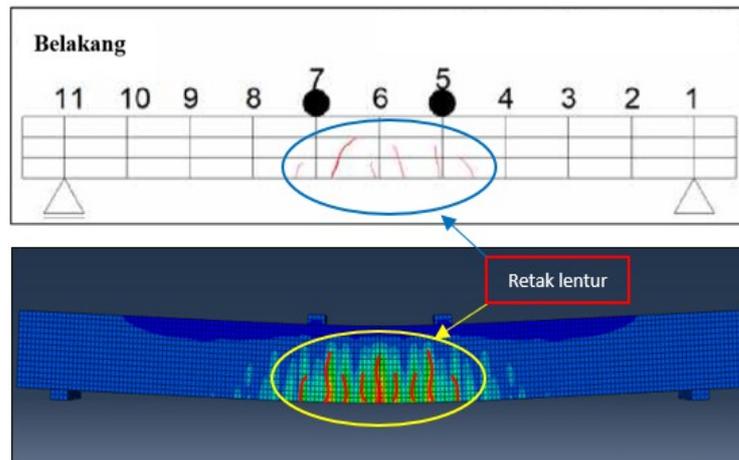
Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dalam pemodelan, kurva beban dan lendutan yang dihasilkan memiliki perilaku yang sama dengan kurva beban dan lendutan yang dihasilkan dari uji eksperimental. Dengan pemberian beban sebesar 2305,75 kg, lendutan yang dihasilkan dari pemodelan adalah sebesar 26,49 mm. Persentase selisih lendutan antara hasil pemodelan dan uji eksperimental adalah sebesar 1,49%. Hal ini menandakan bahwa hasil lendutan yang didapatkan dari pemodelan menghasilkan hasil yang sangat dekat dengan hasil eksperimental.



Gambar 10. Hubungan beban-lendutan pada balok normal.

4.1.2. Pola Retak

Pola retak yang dihasilkan dalam pengujian secara eksperimental di laboratorium dan dalam pemodelan menggunakan *software* berbasis elemen hingga terjadi di tengah bentang yaitu di daerah lenturnya. Tipe keretakan ini termasuk dalam jenis retak lentur. Hal ini ditandai dengan adanya retakan berupa garis-garis yang terjadi di tengah bentang pada balok. Retakan yang terjadi berawal dari sisi terbawah balok dan merambat hingga setengah dari tinggi balok.

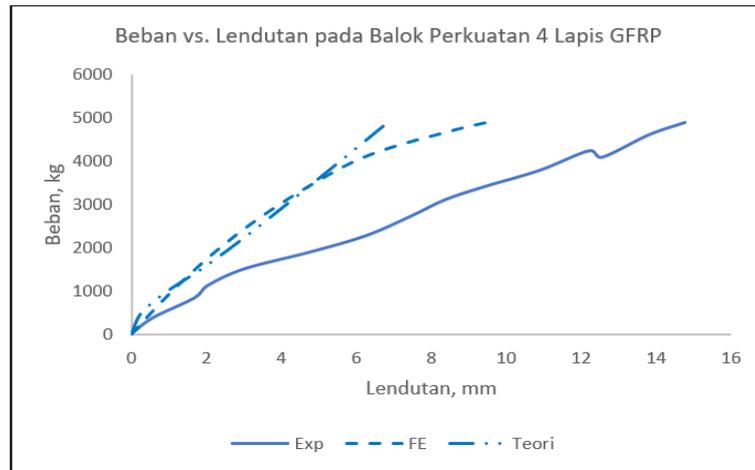


Gambar 11. Pola retak pada balok normal.

4.2. Balok Perkuatan 4 Lapis GFRP

4.2.1. Hubungan beban dan lendutan

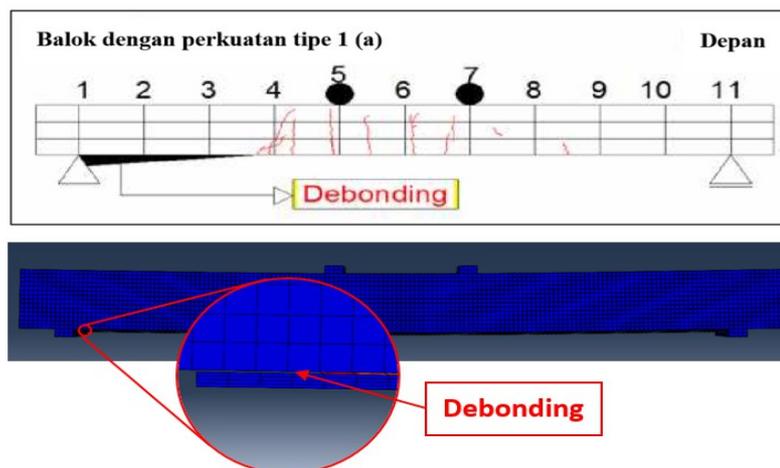
Dengan pemberian beban sebesar 4884,82 kg, lendutan yang dihasilkan dari pemodelan adalah sebesar 9,48 mm. Persentase selisih lendutan antara hasil pemodelan dan uji eksperimen adalah sebesar 21,81%. Lendutan yang dihasilkan dari pemodelan lebih kaku dibandingkan dengan lendutan yang dihasilkan dari uji eksperimental. Selain disebabkan oleh interaksi antara tulangan baja dan balok beton yang dilakukan di dalam pemodelan diasumsikan terikat secara sempurna, hal ini dapat disebabkan oleh parameter *cohesive properties* yang digunakan dalam memodelkan perilaku epoksi masih belum sesuai dengan yang sebenarnya karena *cohesive properties* yang digunakan di dalam pemodelan didapatkan dari perhitungan menggunakan rumus empiris, bukan hasil uji laboratorium. Lendutan yang dihasilkan dari hasil perhitungan secara teoritis yaitu sebesar 6,83 mm menunjukkan nilai yang dekat dengan hasil yang didapat dari hasil pemodelan. Persentase selisih lendutan antara hasil perhitungan secara teoritis dan hasil pemodelan adalah sebesar 16,22%.



Gambar 12. Hubungan beban-lendutan pada balok perkuatan 4 lapis GFRP.

4.2.2. Pola Retak

Pola retak yang dihasilkan dalam pengujian secara eksperimental di laboratorium terjadi di tengah bentang yaitu di daerah lenturnya. Tipe keretakan ini terjadi disebabkan oleh momen lentur yang terjadi pada balok. Hal ini dapat dilihat dari garis-garis vertikal yang tampak di tengah bentang, mulai dari sisi terbawah balok hingga hampir sampai pada sisi atas balok. Namun keretakan ini belum terjadi dalam pemodelan yang dilakukan menggunakan *software*. Hal ini dikarenakan pembebanan yang dimasukkan ke dalam program dibatasi hingga GFRP yang direkatkan pada daerah lentur balok mengalami *debonding*, sehingga balok beton belum mengalami retak. Pada pengujian secara eksperimen, GFRP mengalami *debonding* di bagian ujungnya. Hal ini juga terjadi pada pemodelan yang dilakukan menggunakan *software*.



Gambar 13. Pola retak pada balok perkuatan

5. KESIMPULAN

Persentase selisih hasil antara pemodelan dan uji eksperimental pada balok normal adalah 1,49% untuk lendutan di tengah bentang. Pola retak yang terjadi pada balok normal dalam pemodelan dan eksperimental menunjukkan pola retak yang sama yaitu retak lentur. Persentase selisih hasil antara pemodelan dan uji eksperimental pada balok perkuatan adalah 21,81% untuk lendutan di tengah bentang. Dalam uji eksperimental dan pemodelan, GFRP yang diaplikasikan mengalami *debonding* sebelum regangan tekan beton mencapai regangan ultimitnya. Balok normal dan balok perkuatan yang dimodelkan menggunakan *software* menjadi lebih kaku dibandingkan dengan hasil uji eksperimental dikarenakan interkasi antara tulangan baja dan balok beton diasumsikan terikat secara sempurna.

DAFTAR PUSTAKA

- Gangarao, H. V. S., Taly, N., dan Vijay, P. V., 2006. *Reinforced Concrete Design with FRP Composites*, CRC Press, London.
- Günel, M. H., 1995. *Deflections of Reinforced Concrete Beams and Columns*, Tesis, Middle East Technical University, Turkey.
- Lu, X. Z., Teng, J. G., Ye, L.P. dan Jiang, J.J., 2005. *Bond-slip models for sheets/plates bonded to concrete*. *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 6, Hal. 938–950.
- Nalarita, K., 2019. *Studi Perkuatan Lentur Beton Bertulang Menggunakan GFRP dan Wiremesh*, Skripsi, Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Rada, S., 2018. *Pemodelan Metode Elemen Hingga Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) yang Dikenai Lentur dan Geser*, Tesis, Universitas Atma Jaya, Yogyakarta.
- Saenz, L. P., 1964. *Discussion of Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete-By Desayi and Krishnan*, *ACI Journal Proceedings*, Vol. 61, No. 6, Hal.1236-1238.
- Widyaningsih, E., Herbudiman, B., dan Hardono, S., 2016. *Kajian Eksperimental Sambungan Material Fiber Reinforced Polymer*, *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, Vol.2 No. 3.