



Analisis numerik perilaku lentur balok yang diperkuat dengan GFRP dan wiremesh

Mohd Isneini ^{a,*}, Fikri Alami^b, Nadya Agustina^c

^a Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

^b Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

^c Mahasiswa Program Studi S1 Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

HIGHLIGHTS

- Penelitian terhadap penggunaan lembaran GFRP dan wiremesh sebagai kombinasi perkuatan.
- Analisis numerik dilakukan sebagai perbandingan kajian eksperimental.
- Pemodelan berbasis elemen hingga

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diterima 12 Maret 2020

Diterima setelah diperbaiki 18 April 2020

Diterima untuk diterbitkan 21 April 2020

Tersedia secara online 1 Agustus 2020

Kata kunci:

Beton,
GFRP,
pemodelan,
perkuatan,
wiremesh.

ABSTRAK

Penelitian ini menggunakan tiga jenis balok yaitu balok tanpa perkuatan (B1), balok dengan perkuatan kombinasi GFRP dan Wiremesh (B2) dan balok dengan perkuatan Wiremesh saja (B3) dengan analisis numerik elemen hingga. Dalam memodelkan beton dan GFRP dideskripsikan sebagai elemen solid, kemudian untuk model tulangan dan wiremesh sebagai elemen *truss* dan model epoksi sebagai elemen *cohesive*. Interaksi yang diberikan pada hubungan antara tulangan dan beton serta hubungan antara epoksi dan wiremesh menggunakan teknik interaksi *embedded region* kemudian pada hubungan lapisan perkuatan dan lapisan epoksi menggunakan teknik interaksi *tie constraint*. Berdasarkan input beban maksimum hasil eksperimental, perbedaan persentase regangan pada model balok B1 sebesar 2% antara model numerik dan eksperimental, pada balok B2 adalah sebesar 30% dan pada balok B3 adalah sebesar 30%.

Diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

1. Pendahuluan

Banyak penelitian yang berfokus pada simulasi perilaku beton bertujuan untuk menemukan kondisi kritis saat beton dikenakan beban. Perkembangan ilmu pengetahuan di era digital saat ini, memunculkan metode baru yang dapat mempermudah pekerjaan salah satunya yakni simulasi perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan kombinasi GFRP dan wiremesh dengan bantuan *software*. Data dan hasil dari studi eksperimental yang telah dilakukan dapat juga di evaluasi dengan melakukan pemodelan struktur. Salah satu pendekatan dengan pemodelan yang dapat dilakukan yaitu dengan *software* berbasis simulasi metode numerik elemen hingga. Hasil pemodelan dari *software* ini akan divalidasi dengan hasil

studi eksperimental yang telah dilakukan oleh Vernanda [1] yang menggabungkan penggunaan GFRP dengan wiremesh dan Akbar [2] yang memperkuat balok dengan wiremesh.

2. Metode Penelitian

Dua model terdiri atas model eksperimental sebagai referensi pemodelan dan model numerik hasil dari pendekatan menggunakan *software*. Penetapan model untuk simulasi numerik sudah tervalidasi dengan hasil dari percobaan eksperimental.

3. Penetapan Model

Pada pemodelan, dibuat model pendekatan dengan mendekati proses sebenarnya di laboratorium. Setelah proses laminasi dengan lem epoksi mengering, selanjutnya komposit perkuatan diberi lem epoksi kembali untuk proses pelekatan dengan struktur balok beton. Perkuatan yang dipasang memiliki panjang 1440 mm dan lebar 150 mm. Model balok B1 adalah balok beton tanpa perkuatan,

* Penulis koresponden

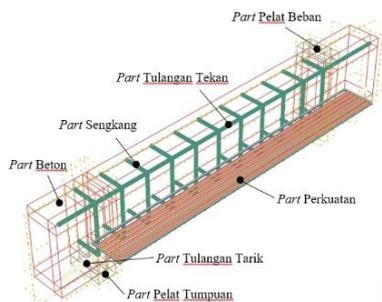
Alamat e-mail: mohd.isneini@eng.unila.ac.id (M. Isneini)

Peer review dibawah tanggung-jawab Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.

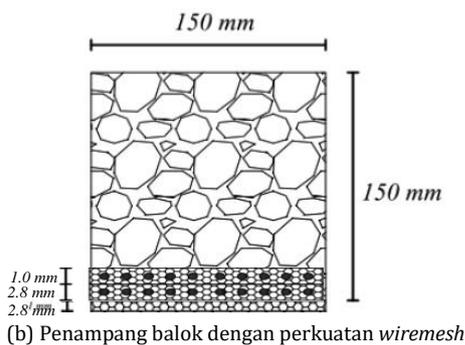
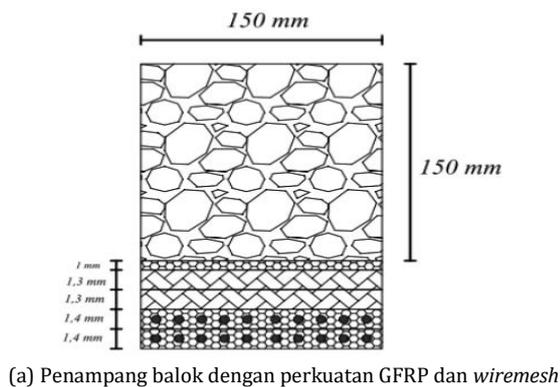
<https://doi.org/10.23960/rekrjits.v24i2.4>

balok B2 diperkuat dengan kombinasi dua lembar GFRP dan dua lembar komposit *wiremesh* yang mempunyai tebal total sebesar 5.20 mm. Balok B3, diperkuat dengan dua lembar komposit *wiremesh* dengan tebal perkuatannya sebesar 3.33 mm. Sedangkan, untuk epoksi diberikan ketebalan sebesar 1 mm. Pada *software* tentunya didefinisikan dimensi balok, beserta bagian-bagiannya, parameter nilai tegangan, kondisi batas tumpuan dan sebagainya sehingga terjalin Interaksi antar elemen beton, epoxy, GFRP, dan *wiremesh* pada *software* tersebut.

Atas alasan efisiensi pekerjaan, model balok pada *software* disederhanakan menjadi model 1/4 balok, karena balok simetris ditinjau dari struktur, tumpuan dan beban, seperti terlihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1 Model penampang balok dengan perkuatan

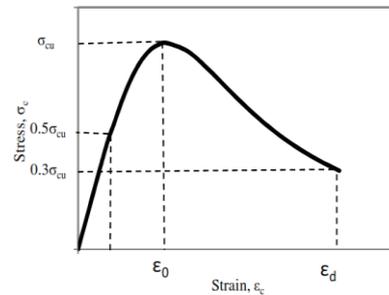


Gambar 2 Pendekatan pemodelan balok perkuatan (a dan b)

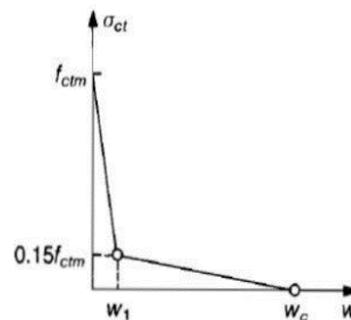
4. Material Properties

Dalam memodelkan material beton, ada dua mekanisme kegagalan yaitu gagal tarik dan kehancuran tekan. Perilaku tegangan-regangan beton dalam model tekan dimodelkan menggunakan konstitutif hubungan yang mengacu pada Hsu dan Hsu [3]. Metode pendekatan *crack-opening-*

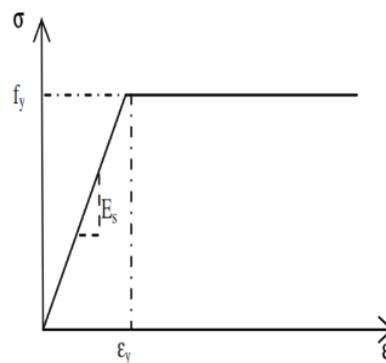
displacement digunakan dalam pemodelan respon tarik beton, karena metode ini dianggap paling praktis dan sesuai. Konstitutif model menggunakan hubungan *stress-displacement* yang mengacu pada CEB-FIP [4]. Perilaku tegangan-perpindahan bilinear dalam pemodelan epoksi menggunakan konstitutif hubungan yang mengacu pada Lu *dkk.* [5]. Adapun model konstitutif material dapat dilihat pada Gambar 3.



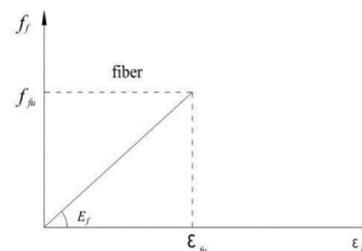
(a) kehancuran tekan material beton



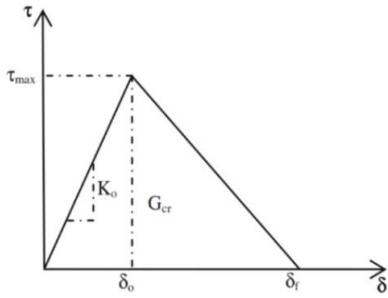
(b) kegagalan tarik material beton



(c) tegangan-regangan tulangan dan *wire mesh*



(d) Tegangan-regangan FRP



(d) Bilinear traction-separation epoksi.

Gambar 3 Konstitutif material

Selanjutnya, disajikan persamaan-persamaan yang berkaitan dalam material serta bilinear epoxy:

4.1 Material beton kehancuran tekan

Persamaan-persamaan yang dipakai adalah sebagai berikut:

$$\sigma_c = \left(\frac{\beta \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)}{\beta - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^\beta} \right) \sigma_{cu} \tag{1}$$

$$\beta = \frac{1}{1 - \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_0 E_0} \right)} \tag{2}$$

$$\epsilon_0 = 8,9 \times 10^{-5} \sigma_{cu} + 2,114 \times 10^{-3} \tag{3}$$

$$E_0 = 1,2431 \times 10^2 \sigma_{cu} + 3,28312 \times 10^3 \tag{4}$$

dengan catatan, pada rumus di atas σ_c , σ_{cu} dan E_0 dalam satuan kip/in² (konversi faktor: 1 MPa = 0,145037743 kip/in²).

4.2 Material beton kegagalan tarik

Persamaan yang dipakai adalah Persamaan 5 sampai Persamaan 9.

$$f_t = f_{ctm} \left(1 - 0,85 \frac{w}{w_1} \right) \quad f_{ctm} = 0,15 f_{ctm} \leq f_t \leq f_{ctm} \tag{5}$$

$$f_t = \frac{0,15 f_{ctm}}{w_c - w_1} (w_c - w) \quad f_{ctm} = 0 \leq f_t \leq 0,15 f_{ctm} \tag{6}$$

$$w_1 = 2 \frac{G_f}{f_{ctm}} - 0,15 w_c \tag{7}$$

$$w_c = \alpha_f \frac{G_f}{f_{ctm}} \tag{8}$$

$$f_{ctm} = f_{ctko}, m \left(\frac{f_{ck}}{f_{cko}} \right)^{2/3} \tag{9}$$

dengan nilai dari f_{ctko} , m diambil sebesar 1,4 MPa dan f_{cko} sebesar 10 MPa. w mewakili crack opening (mm), w_1 adalah crack opening pada ($f_t = 0,15 f_{ctm}$), w_c adalah crack opening pada poin kegagalan total ($f_t = 0$) dan G_f adalah fraktur energi yang dihitung berdasarkan Persamaan 10.

$$G_f = G_{f0} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0,7} \tag{10}$$

dengan nilai f_{cm0} diambil sebesar 10 MPa. f_{cm} adalah nilai rata-rata dari kuat tekan beton dan dapat diekspresikan sebagai fungsi dari kuat tekan beton karakteristik, f_{ck} yang ditunjukkan pada Persamaan 11.

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \tag{11}$$

dengan Δf diambil sebesar 8 MPa. Reineck dkk [6] menyarankan untuk kuat tekan beton karakteristik, f_{ck}

dapat dihitung sebagai fungsi dari kuat silinder beton, f'_c yang ditunjukkan pada Persamaan 12.

$$f_{ck} = f'_c - 1,6 \tag{12}$$

untuk G_{f0} yang merupakan nilai dasar dari fraktur energi, bergantung pada ukuran agregat maksimum, d_{max} dimana nilainya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1
Nilai dasar fraktur energi, G_{f0} [4]

d_{max} (mm)	G_{f0} (Nmm/mm ²)	α_f
8	0,025	8
16	0,030	7
32	0,058	5

Pada model penelitian ini, besar G_{f0} diambil nilai 0,025 sedangkan untuk nilai koefisien, α_f diambil nilai 8 berdasarkan ukuran agregat maksimum pada sampel uji percobaan laboratorium.

4.3 Material bilinear epoksi

Persamaan-persamaan yang dipakai adalah sebagai berikut:

$$T = \tau_{max} \sqrt{\frac{s}{s_0}} \quad s \leq s_0 \tag{13}$$

$$\tau = \tau_{max} \frac{s_f - s}{s_f - s_0} \quad s_0 < s < s_f \tag{14}$$

$$\tau = 0 \quad s > s_f \tag{15}$$

$$s_f = \frac{2 G_f}{\tau_{max}} \tag{16}$$

dengan,

$$\tau_{max} = \frac{N_f max}{L_e b_f} \tag{17}$$

$$N_f max = \alpha_1 c_1 k_c k_b b_c \sqrt{n_f t_f E_f f'_t} \tag{18}$$

$$L_e = \sqrt{n_f t_f E_f} \sqrt{c_2 f'_t} \tag{19}$$

$$f'_t = 0,18 f'_c \tag{20}$$

$$S_0 = 0,0195 \beta_w f'_t \tag{21}$$

$$G_f = 0,308 \beta_w^2 \sqrt{f'_t} \tag{22}$$

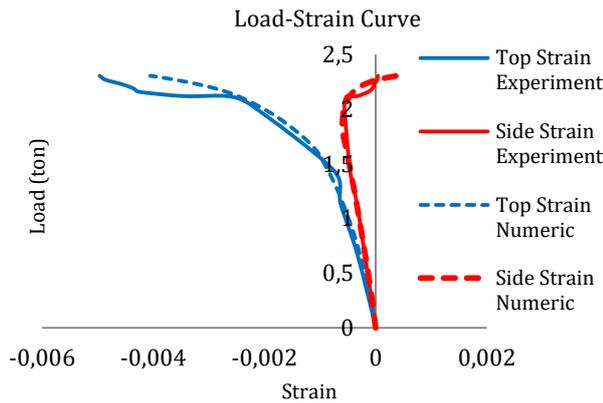
$$\beta_w = \sqrt{\frac{2,25 - \frac{b_f}{b_c}}{1,25 + \frac{b_f}{b_c}}} \tag{23}$$

$$K_{nn} = \alpha \frac{E}{t} \tag{24}$$

$$\frac{K_{ss}}{K_{tt}} = \alpha \frac{G_c}{t} \tag{25}$$

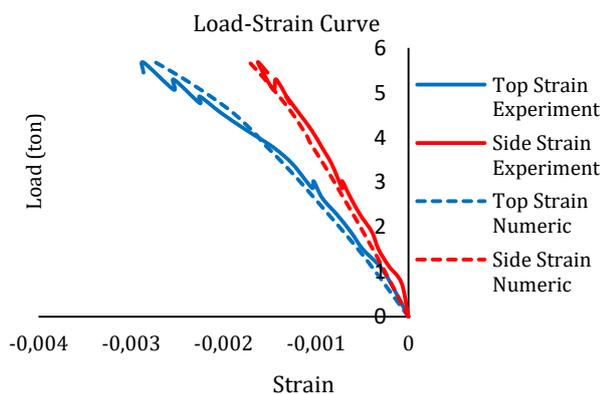
5. Hasil dan Pembahasan

Setelah dilakukan plot data dan dibandingkan dengan data hasil studi eksperimental maka dapat disajikan hubungan beban dan regangan pemodelan dan hasil ekperimental balok beton bertulangan dengan perkuatan yang ditunjukkan dalam Gambar 4, Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 4 Hubungan beban dan regangan Balok B1

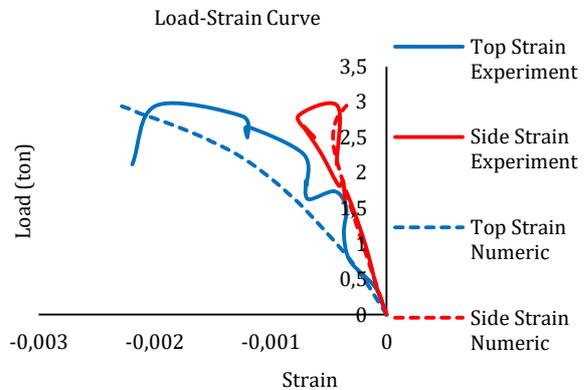
Regangan pada balok B1 bagian atas dengan beban input sebesar 2,307 ton pada simulasi numerik diperoleh nilai sebesar -0,00405517 sedangkan pada eksperimental diperoleh nilai sebesar -0,004966. Regangan pada balok normal pada bagian sisi samping pada simulasi numerik, struktur beton mengalami tarik sehingga regangan bernilai positif sebesar 0,00039741 pada beban sebesar 2,307 ton, nilai tersebut lebih kecil dibandingkan dengan regangan tarik (ϵ_t) teori maksimum yang didapat sebesar 0,01672. Hal ini disebabkan oleh baja tulangan yang telah mengalami leleh sehingga balok sudah tidak bisa menahan beban. Sedangkan pada eksperimental, struktur beton mengalami tarik sehingga regangan bernilai positif sebesar 0,000041 pada beban sebesar 2,307 ton. Hal ini disebabkan oleh baja tulangan yang telah mengalami leleh sehingga balok sudah tidak bisa menahan beban dan *strain gauge* tidak bisa membaca regangan yang terjadi. Simulasi numerik yang dilakukan dengan input nilai beban yang senilai dengan eksperimental menghasilkan perilaku lentur yang mendekati nilai regangan dari eksperimental pada regangan beton namun tidak mencapai besar regangan seperti hasil eksperimental namun hal ini dikesampingkan mengingat besar lendutan yang sudah bersesuaian dan untuk regangan beton sudah mencapai regangan 0,003 sudah dianggap beton mengalami kehancuran.



Gambar 5 Hubungan beban dan regangan Balok B2

Regangan pada balok B2 bagian atas dengan beban input sebesar 5,675 ton pada simulasi numerik diperoleh nilai sebesar -0,0027321 sedangkan pada eksperimental diperoleh nilai sebesar -0,002864. Besar nilai regangan yang diperoleh pada percobaan eksperimental dan pemodelan sesuai dengan model kehancuran yang terjadi yaitu kegagalan pada lekatan sehingga regangan beton

belum mencapai regangan 0,003. Regangan pada balok B2 pada bagian sisi samping pada simulasi numerik diperoleh nilai akhir sebesar -0,0017162 sedangkan pada eksperimental diperoleh nilai akhir sebesar -0,00152. Simulasi numerik yang dilakukan dengan input nilai beban yang senilai dengan eksperimental menghasilkan perilaku lentur yang mendekati nilai regangan pada eksperimental pada regangan beton bagian atas dan samping balok beton.



Gambar 6 Hubungan beban dan regangan Balok B3

Regangan pada balok B3 bagian atas dengan beban input sebesar 2,95 ton pada simulasi numerik diperoleh nilai sebesar -0,0023008 sedangkan pada eksperimental diperoleh nilai sebesar -0,002194. Besar nilai regangan yang diperoleh pada percobaan eksperimental dan pemodelan sesuai dengan model kehancuran yang terjadi yaitu kegagalan pada lekatan dengan patahan di bagian tengah perkuatan sehingga regangan beton belum mencapai regangan 0,003. Regangan pada balok B3 pada bagian sisi samping pada simulasi numerik diperoleh nilai akhir sebesar -0,00034577 sedangkan pada eksperimental diperoleh nilai akhir sebesar -0,00043. Simulasi numerik yang dilakukan dengan input nilai beban yang senilai dengan eksperimental menghasilkan perilaku lentur yang mendekati nilai regangan pada eksperimental pada regangan beton bagian atas dan samping balok beton. Perbedaan persentase regangan pada model balok B1 sebesar 2% antara model numerik dan eksperimental, pada balok B2 adalah sebesar 30% dan pada balok B3 adalah sebesar 30%. Adapun rangkuman hasil uji hubungan beban – regangan, disajikan pada Table 2.

Tabel 2 Hasil beban-regangan pemodelan dan eksperimental

Model	Beban (ton)	Sisi balok	Regangan numerik	Regangan Eksperimental
B1	2,307	Atas	-0,00405517	-0,004966
		Samping	0,00039741	0,000041
B2	5,675	Atas	-0,0027321	-0,002864
		Samping	-0,0017162	-0,00152
B3	2,95	Atas	-0,0023008	-0,002194
		Samping	-0,00034577	-0,00043

6. Simpulan

Grafik hubungan beban dan regangan perbandingan antara hasil pemodelan dengan hasil eksperimental untuk model balok tanpa perkuatan (B1) dan balok dengan

perkuatan GFRP dan *Wiremesh* (B2) serta balok dengan perkuatan *Wiremesh* (B3) memiliki perilaku yang serupa. Hasil yang diperlihatkan pada pemodelan didapat nilai regangan yang lebih kecil dibandingkan dengan hasil eksperimental namun sudah memenuhi syarat yang ditentukan untuk balok tanpa perkuatan (B1) mencapai regangan beton (ϵ_c) 0,003 dan balok beton-perkuatan (B2) dan (B3) dibawah regangan beton (ϵ_c) 0,003 karena terjadi kegagalan lekatan beton dan perkuatan. Berdasarkan perilaku lentur untuk hubungan beban dan regangan yang didapat pada pemodelan balok beton yang dimodelkan, dapat disimpulkan bahwa parameter mekanis material seperti *elastic* dan *plastic properties* yang diterapkan pada pemodelan program sudah sesuai dengan keadaan aktual benda uji.

Daftar Pustaka

- [1] *Vernanda, D.*: Studi eksperimental perkuatan balok beton bertulang dengan mengkombinasikan penggunaan bahan tambahan wiremesh dan GFRP pada beton mutu normal. Skripsi. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik. Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2019
- [2] *Akbar, C.F.*: Studi eksperimental perkuatan balok beton bertulang dengan kombinasi GFRP dan wiremesh. Skripsi. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik. Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2019
- [3] *Hsu, L.S. dan Hsu, C.*: Complete stress-strain behaviour of high-strength concrete under compression. Magazine of Concrete Research, **46**, 1994, 301-312
- [4] *CEB-FIP-1990*. CEB-FIP Model Code 1990. Comite Euro-International du Beton, London, 1990
- [5] *Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P., Jiang, J.J.*: Bond-slip models for sheets/plates bonded to concrete. Engineering Structures, **27**, 6, 2005, 938-950.
- [6] *Reineck K.H., Kuchma D.A., Kang S.K., Marx, S.*: Shear data base for reinforced concrete members without shear reinforcement. ACI Structural Journal, **100**, 2, 2003, 240-249