



Studi numerik pada balok beton bertulang dengan perkuatan *hybrid* menggunakan *glass fiber reinforced polymer* (GFRP) dan *wiremesh*

Mohd Isneini^{a,*}, Fikri Alami^b, Ridho Surahman^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 20 Nopember 2019

Diterima setelah diperbaiki 29 Nopember 2019

Diterima untuk diterbitkan 5 Januari 2020

Tersedia secara *online* 12 Maret 2020

Kata kunci:

Beton,
GFRP,
wiremesh,
debonding,
pemodelan.

ABSTRAK

Dalam pengujian eksperimental yang telah dilakukan, balok beton bertulang yang diberi perkuatan secara *hybrid* menggunakan GFRP dan *wiremesh* dengan kombinasi GFRP+*wiremesh*+*wiremesh*+GFRP (GWWG) dapat meningkatkan kapasitas beban maksimum yang dapat ditahan hingga mencapai 135%. Selanjutnya dilakukan pengujian menggunakan *software* berbasis elemen hingga untuk melihat hasil berdasarkan kedua cara tersebut. Dimensi balok yang dimodelkan berukuran panjang 1,7 m, lebar 15 cm dan tinggi 15 cm. Tebal GFRP yang digunakan adalah 1,33 mm/lapis sedangkan *wiremesh* adalah tipe kawat jala yang dilas berbentuk segi empat dengan diameter kawat sebesar 0,55 mm dan lebar bukaan 7 mm x 7 mm. Dengan mengandalkan geometri dan pembebanan yang simetris, balok hanya dimodelkan seperempat bagiannya saja. Persentase selisih hasil antara pemodelan dan eksperimental yang ditinjau di tengah bentang pada balok normal (BN) adalah 2,94% untuk lendutan, 17,30% untuk regangan serat atas dan 3,00% untuk regangan serat samping. Pola retak yang terjadi pada balok BN dalam pemodelan dan eksperimental menghasilkan pola retak yang sama yaitu retak lentur. Persentase selisih hasil antara pemodelan dan eksperimental yang ditinjau di tengah bentang pada balok GWWG adalah 30,60% untuk lendutan, 17,42% untuk regangan serat atas dan 8,26% untuk regangan serat samping. Perkuatan yang diaplikasikan pada balok mengalami *debonding* sebelum regangan tekan beton mencapai regangan ultimitnya. Hal ini terjadi baik dalam pemodelan maupun eksperimental.

Diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

1. Pendahuluan

Pada umumnya, kerusakan pada struktur beton dapat terjadi karena komponen penyusun struktur tidak lagi sanggup untuk menahan beban yang diterimanya. Kemampuan layan ditentukan oleh lendutan, retak, korosi tulangan dan rusaknya permukaan beton. Toleransi retak yang terjadi pada beton hanya sampai retak rambut [1]. Pengaplikasian *hybrid* menggunakan GFRP dan *wiremesh* merupakan salah satu metode perkuatan struktur yang

cukup populer.

Beton bertulang merupakan salah satu material yang cukup sulit untuk dimodelkan dengan menggunakan *software* berbasis elemen hingga. Model material yang digunakan harus dapat mewakili perilaku elastis dan plastis baik dalam kondisi tekan maupun tarik. Untuk validasi, balok beton yang dimodelkan telah diuji secara eksperimental di laboratorium oleh Vernanda [2].

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Balok beton bertulang

Balok beton bertulang adalah elemen struktur yang didesain untuk menahan beban berupa momen, lintang dan

* 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.v24i1.3>

torsi. Beton memiliki kuat tekan yang tinggi namun kuat tariknya sangat lemah. Oleh karena itu, tulangan baja digunakan untuk menahan tegangan tarik yang muncul pada balok beton. Balok beton berfungsi untuk menahan beban dari pelat, dinding atau balok lainnya yang kemudian diteruskan menuju kolom. Perletakan balok beton dapat berbentuk tertumpu sederhana, menerus atau kantilever. Bentuk penampang balok beton dapat didesain menjadi bentuk kotak, bentuk T dan bentuk L. Perilaku balok beton bertulang dapat dimodelkan menggunakan *software* berbasis elemen hingga. Hasil dari pemodelan menggunakan *software* menghasilkan hasil yang dekat dengan hasil uji eksperimental di laboratorium [3].

2.2 Glass fiber reinforced polymer (GFRP) dan wiremesh

Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) adalah serat polimer yang terbuat dari matriks plastik diperkuat oleh serat halus kaca. Kekuatan yang dimiliki oleh GFRP sangat besar dan bahan yang ringan sehingga cocok untuk material perkuatan pada struktur. Dalam pengujian balok beton bertulang yang diperkuat dengan satu lapis GFRP mampu meningkatkan kuat lentur balok sampai 43,956% [4] dan dengan empat lapis GFRP sampai mampu meningkatkan kapasitas beban sampai 112% [5]. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Surahman [6], balok beton bertulang yang diperkuat dengan empat lapis GFRP di bagian lenturnya yang dimodelkan menggunakan *software* berbasis elemen hingga didapat persentase selisih hasil antara pemodelan dan uji eksperimental untuk regangan di sisi atas dan samping secara berturut-turut adalah 15,18% dan 9,81%.

Wiremesh adalah jaring kawat baja las yang memiliki kualitas yang tinggi dan dibuat dengan pengawasan yang teliti. Saat ini wiremesh cukup populer digunakan sebagai material perkuatan pada struktur. Dalam pengujian yang dilakukan oleh Fauzan [7], balok beton bertulang yang diperkuat dengan dua lapis wiremesh dapat meningkatkan kapasitas beban hingga 27,71%.



Gambar 1 Glass fiber reinforced polymer (GFRP), dan Gambar 2 wiremesh

2.3 Lentutan

Dalam perencanaan balok beton bertulang, lentutan sesaat (*immediate*) maupun lentutan jangka panjang (*long-term*) harus dievaluasi agar lentutan yang terjadi tidak akan melebihi suatu kriteria tertentu. Lentutan yang diizinkan pada struktur sangat bergantung pada besarnya lentutan yang masih dapat ditahan oleh komponen-komponen struktur yang berinteraksi tanpa kehilangan penampilan estetis dan tanpa kerusakan pada elemen yang mengalami defleksi [8]. Lentutan jangka panjang pada balok beton bertulang yang diperkuat dengan GFRP secara eksternal dapat memperkecil defleksi sebesar 33% [9].

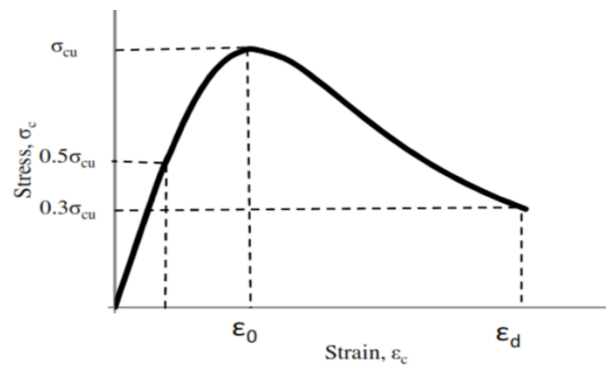
2.4 Pola retak

Salah satu jenis kerusakan yang terjadi pada beton adalah retak. Hal ini dapat diketahui dengan adanya garis-garis halus yang tampak di permukaan beton. Keretakan yang terjadi pada beton dapat terjadi ketika beton belum mengeras maupun ketika sudah mengeras. Ada banyak faktor yang dapat menyebabkan retak pada beton, yaitu *flexural crack*, *shear crack*, *torsion crack*, *corrosion crack*, *shrinkage crack* dan *tension crack*.

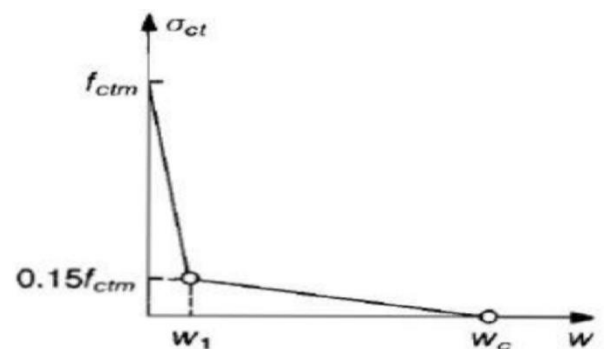
2.5 Parameter material

2.5.1 Material beton

Dalam pemodelan yang dilakukan, perilaku tegangan-regangan beton dimodelkan menggunakan model yang diusulkan oleh Hsu dan Hsu [10], seperti disajikan pada Gambar 3 sampai Gambar 7. Model ini mengasumsikan mekanisme kegagalannya adalah kehancuran tekan dan gagal tarik.



Gambar 3 Hubungan tegangan-regangan tekan beton



Gambar 4 Hubungan stress-displacement tarik beton

Kurva pada Gambar 3 diekspresikan dengan persamaan berikut:

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

$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0 E_0}} \tag{2}$$

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

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

Pada rumus di atas σ_c , σ_{cu} dan E_o dalam satuan kip/in² (konversi faktor: 1 MPa = 0,145037743 kip/in²)

Dalam menggambarkan perilaku tarik beton, digunakan metode pendekatan *crack opening-displacement* karena metode ini dianggap paling sesuai. Perilaku *stress-displacement* yang digunakan mengacu pada CEB-FIP [11]. Kurva pada Gambar 4 dapat diekspresikan dalam Persamaan 5 s.d Pers. 9:

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

$$f_t = \frac{0,15f_{ctm}}{w_c - w_1} (w_c - w) f_{ctm} \text{ untuk } 0 \leq f_t \leq 0,15f_{ctm}$$

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

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

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

dimana nilai dari $f_{ctko,m}$ diambil sebesar 1,4 MPa dan f_{cko} sebesar 10 MPa.

$$G_f = G_{fo} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{0,7}$$

Dimana nilai f_{cmo} diambil sebesar 10 MPa.

$$f_{cm} = f_{ck} \Delta_f$$

dimana Δ_f diambil sebesar 8 MPa.

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

Berdasarkan systems (2014), regangan inelastic ϵ_c^{in} , regangan *crack* ϵ_t^{ck} kerusakan tekan beton d_c dan kerusakan tarik beton d_t dapat dihitung menggunakan Pers. 13 s.d Pers. 16:

$$\epsilon_c^{in} = \epsilon_c - \epsilon_c^{el} = \epsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_{co}}$$

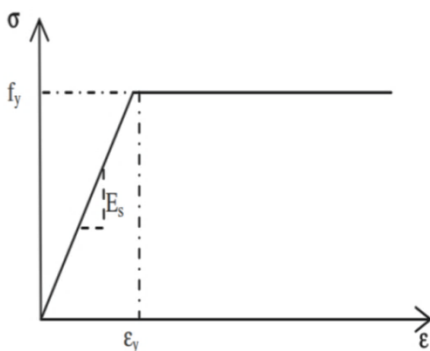
$$\epsilon_t^{ck} = \epsilon_t - \epsilon_t^{el} = \epsilon_t - \frac{f_t}{E_{to}}$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}}$$

$$d_t = 1 - \frac{f_t}{f_{ctm}}$$

2.5.2 Material baja

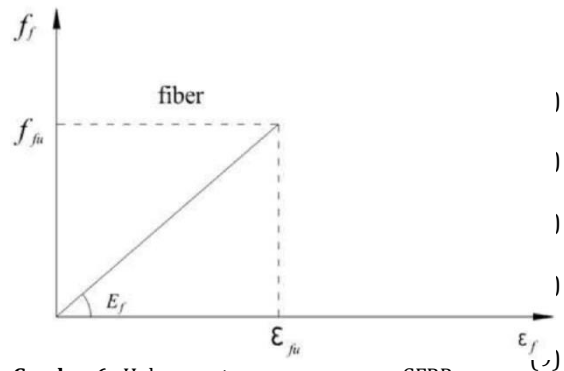
Hubungan tegangan-regangan pada baja tulangan dan *wiremesh* dimodelkan menggunakan hubungan tegangan-regangan *elastic perfectly plastic*, seperti pada Gambar 5. Dalam model ini, regangan pengerasan bahan (*strain hardening*) tidak diperhitungkan.



Gambar 5 Hubungan tegangan-regangan baja

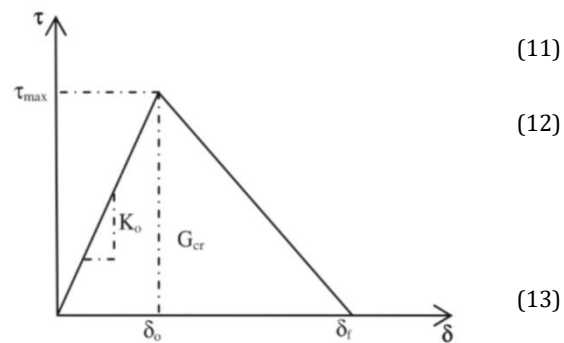
2.5.3 Material GFRP dan epoksi

Hubungan tegangan-regangan material GFRP diasumsikan linear hingga tegangan ultimitnya. Kurva tegangan-regangan material GFRP disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6 Hubungan tegangan-regangan GFRP

Perilaku tegangan-*displacement* pada epoksi dimodelkan menggunakan model yang diajukan oleh Lu [12] yang disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7 Hubungan tegangan-*displacement* epoksi

3. Metode Penelitian

3.1 Skema balok eksperimental

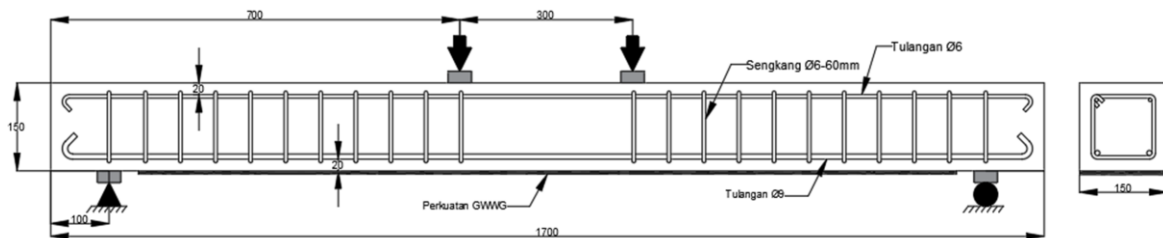
Ada dua balok yang dimodelkan dalam penelitian ini yaitu balok normal (BN) dan balok perkuatan dengan kombinasi GFRP + *wiremesh* + *wiremesh* + GFRP (GWWG). Dimensi balok beton memiliki ukuran panjang 170 cm, lebar 15 cm dan tinggi 15 cm. Tulangan tarik yang digunakan berukuran 9 mm dan tulangan tekan berukuran 6 mm. Diameter sengkang yang digunakan berdiameter 6 mm yang dipasang pada setiap 60 mm. Tegangan leleh baja yang digunakan adalah sebesar 406 MPa. Tebal GFRP yang digunakan berukuran 1,33 mm/lapis dengan tegangan leleh 460 MPa sementara *wiremesh* yang digunakan berdiameter 0,55 mm tipe kawat jala yang dilas berbentuk persegi dengan lebar bukaan 7 mm x 7 mm dengan tegangan leleh sebesar 250 MPa. Beban yang diberikan adalah dua beban terpusat pada jarak 600 mm dari masing-masing tumpuan. Tampilan skema balok eksperimental disajikan pada Gambar 8.

3.2 Skema balok pemodelan

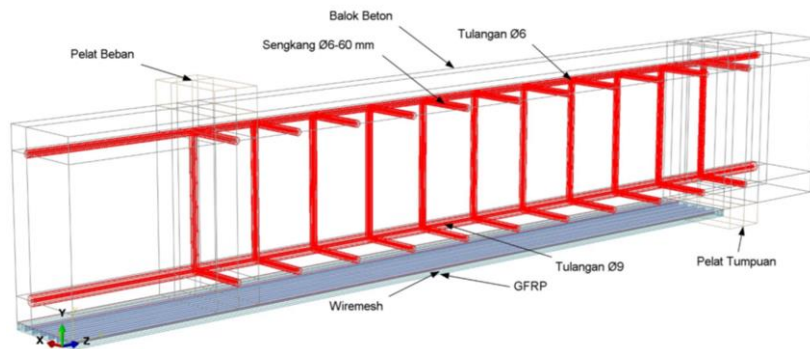
Dalam pemodelan yang dilakukan menggunakan *software* berbasis elemen hingga, balok hanya dimodelkan seperempat bagiannya saja. Hal ini dikarenakan geometri dan beban pada balok yang dimodelkan simetris. Hal ini dapat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk menjalankan model karena jumlah *degree of freedom* (DOF) pada model menjadi jauh lebih sedikit sehingga proses pemodelan menjadi lebih efisien. Skema balok pada pemodelan disajikan pada Gambar 9.

4.1.2 Hubungan beban-regangan

Dengan pemberian beban sebesar 2310 kg, regangan yang didapatkan dari pemodelan menggunakan *software* berbasis elemen hingga pada sisi atas dan samping secara berturut-turut adalah sebesar -0,0041 dan 0,000049 sedangkan dari uji eksperimental adalah sebesar -0,0050 dan 0,000050 dengan persentasi selisih sebesar 17,30% untuk sisi atas dan 3,01% untuk sisi samping. Hasil dari pemodelan tersebut sangat dekat dengan hasil dari uji eksperimental. Hal ini menandakan bahwa pemilihan jenis



Gambar 8 Tampilan skematis balok eksperimental (dimensi dalam mm)



Gambar 9 Model balok dalam *software* berbasis elemen hingga

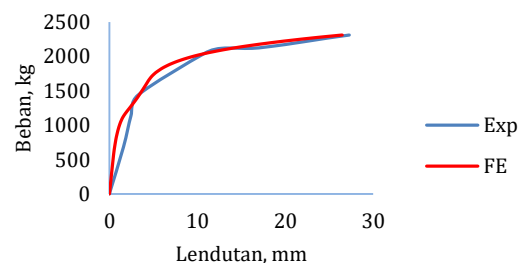
4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Balok normal (BN)

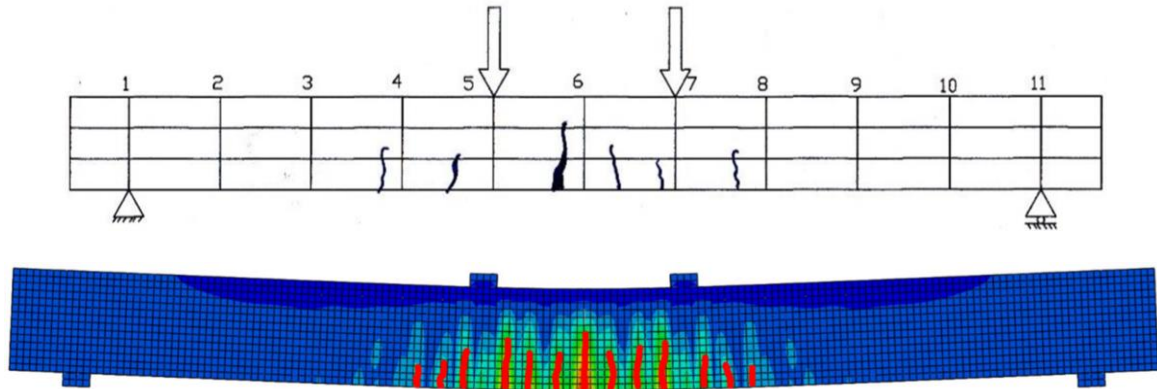
4.1.1 Hubungan beban dan lendutan

Hubungan beban-lendutan pada balok normal yang dihasilkan dari pemodelan menggunakan *software* berbasis elemen hingga memiliki perilaku yang hampir sama. Namun lendutan yang dihasilkan dari pemodelan lebih kaku dibandingkan dari hasil uji eksperimental di laboratorium. Hal ini dapat disebabkan oleh interaksi antara baja tulangan dan balok beton dimodelkan menggunakan *embedded element* sehingga baja tulangan menjadi terikat secara sempurna di dalam balok beton. Lendutan di tengah bentang yang didapatkan dengan beban sebesar 2310 kg dari uji eksperimental (Exp) adalah sebesar 27,29 mm sedangkan dari pemodelan (FE) adalah sebesar 26,49 mm. Persentase selisih antara lendutan dalam uji eksperimental dan pemodelan adalah sebesar 2,94%. Perilaku beban-lendutan pada balok BN antara uji eksperimental dan pemodelan semakin selaras ketika beban 2041,16 kg. Hubungan beban-lendutan di tengah bentang pada balok BN disajikan pada Gambar 10.

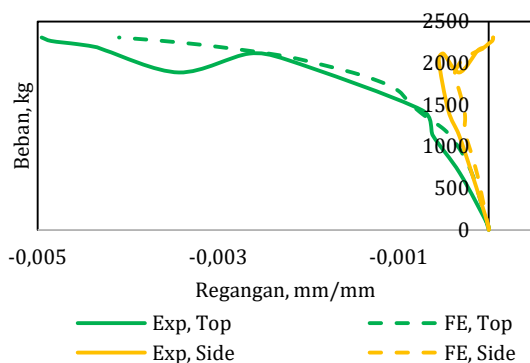
elemen dan model material properties yang digunakan dalam pemodelan sudah cukup sesuai dan dapat mewakili perilaku aslinya. Regangan beton di sisi samping yang semula negatif namun berbalik menjadi positif saat mencapai beban maksimumnya. Hal ini terjadi baik pada uji eksperimental maupun pemodelan. Hubungan beban-regangan pada balok BN disajikan pada Gambar 11.



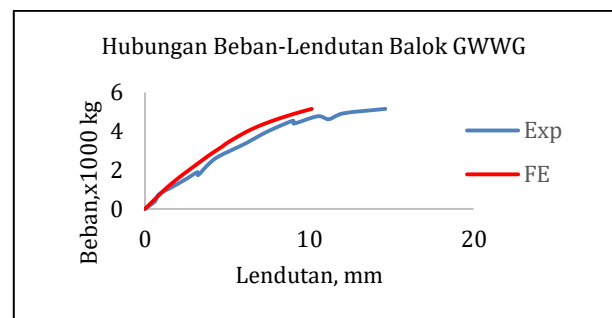
Gambar 10 Grafik hubungan beban-lendutan pada balok BN



Gambar 12 Pola retak balok BN pada (a) Uji eksperimental dan (b) Pemodelan



Gambar 11 Grafik hubungan beban-regangan pada balok BN



Gambar 13 Grafik hubungan beban-lendutan pada balok GWWG

4.1.3 Pola Retak

Pola retak pada balok BN yang dihasilkan dalam pemodelan menggunakan *software* berbasis elemen hingga dan uji eksperimental menunjukkan tipe retak yang sama yaitu retak lentur. Hal ini ditandai dengan adanya garis-garis retakan yang muncul di tengah balok, mulai dari sisi bawah balok dan merambat menuju ke atas hingga garis netral balok. Pola retak pada balok BN disajikan pada Gambar 12.

4.2 Balok perkuatan (GWWG)

4.2.1 Hubungan beban-lendutan

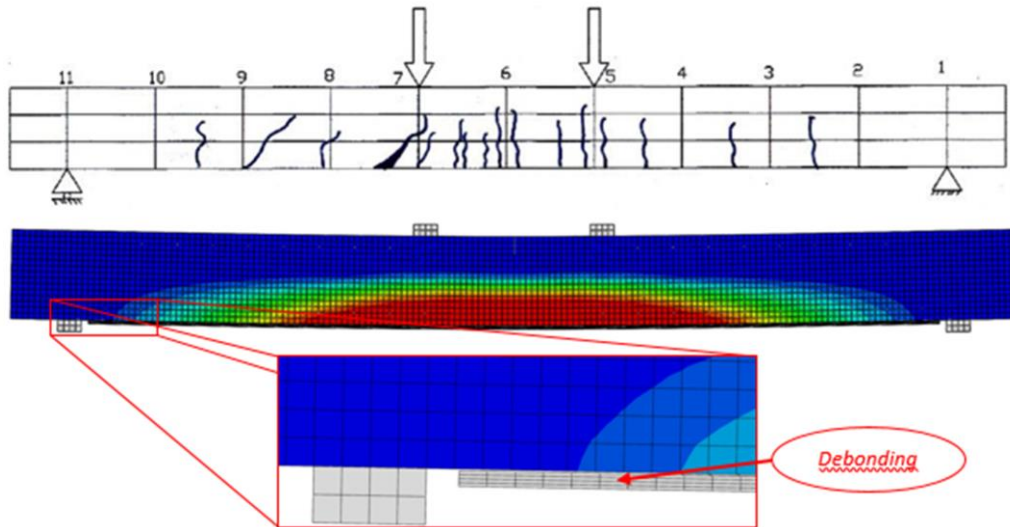
Lendutan yang didapatkan pada balok GWWG dari hasil pemodelan adalah sebesar 10,12 mm dengan besar beban sebesar 5,145 kg sementara lendutan yang dihasilkan dari uji eksperimental adalah sebesar 14,62 mm. Persentase selisih hasil antara pemodelan dan uji eksperimental adalah sebesar 30,60%. Selain karna interaksi antara tulangan baja dan balok beton yang dimodelkan terikat sempurna menggunakan *embedded element*, juga dapat disebabkan oleh model material epoksi yang digunakan masih belum dapat mewakili perilaku epoksi yang sebenarnya. Hal ini juga mengakibatkan lendutan yang dihasilkan dari pemodelan menjadi lebih kecil dibandingkan lendutan yang dihasilkan dari uji eksperimental. Hubungan beban-lendutan pada balok GWWG disajikan pada Gambar 13.

4.2.2 Hubungan beban-regangan

Hubungan beban-regangan yang dihasilkan dari pemodelan menggunakan *software* berbasis elemen hingga pada balok GWWG sangat baik dan dekat dengan hasil dari uji eksperimental. Dengan beban sebesar 5145 kg, regangan maksimum yang ditinjau di tengah bentang pada balok berturut-turut adalah sebesar -0,0022 dan -0,0016 sedangkan hasil dari uji eksperimental adalah sebesar -0,0018 dan -0,0015. Persentase selisih antara regangan dari hasil pemodelan dan uji eksperimental di sisi atas dan samping balok beton secara berturut-turut adalah sebesar 17,42% dan 8,26%. Dalam uji eksperimental, regangan pada GFRP di lapisan paling bawah tidak dapat terbaca hingga mencapai beban maksimum karena *strain gauge* yang dipasang pada balok GWWG mengalami kerusakan sehingga data yang mampu dicatat *strain indicator* hanya sampai beban sebesar 1513 kg dengan regangan sebesar 0,001194. Sementara itu, regangan GFRP yang dihasilkan dari pemodelan pada beban sebesar 5448 kg adalah sebesar 0,00119. Hubungan beban-regangan pada balok GWWG yang ditinjau di tengah bentang disajikan pada Gambar 14.

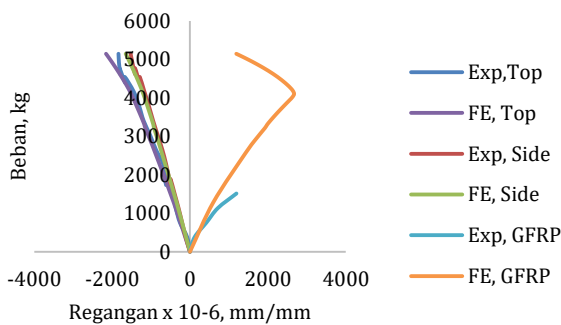
4.2.3 Pola retak dan debonding

Dalam pemodelan balok GWWG menggunakan *software* berbasis elemen hingga, balok GWWG mengalami retakan hampir di seluruh bagian tengah bentangnya. Selain itu, perkuatan GFRP dan *wiremesh* yang diaplikasikan di daerah lentur balok mengalami *debonding*, yaitu lepasnya perkuatan GFRP dan *wiremesh* yang diaplikasikan di balok GWWG yang



Gambar 15 Pola retak dan debonding

disebabkan oleh epoksi resin yang digunakan untuk merekatkan antara balok beton dan perkuatan sudah tidak sanggup untuk menahan beban. Kegagalan yang terjadi pada balok GWWG disajikan pada Gambar 15 berikut.



Gambar 14 Grafik hubungan beban-regangan balok GWWG

Untuk pola retak pada eksperimental dapat dilihat pada Gambar 16 dan Gambar 17 berikut ini.



Gambar 16 Retak pada tengah bentang [2]



Gambar 17 Retak pada sebagian bentang [2]

Dari retak yg terlihat, kemudian digambarkan seperti terlihat pada bagian atas Gambar 15. Hasil perbandingan antara eksperimental dan analisis mendapatkan hasil yang cukup baik, sebagaimana halnya hasil penelitian Sinae *dkk*, [3], yang menunjukkan bahwa *displacement*, regangan tarik untuk tulangan utama, regangan tekan untuk beton dan pola retak yang diperoleh dari model elemen hingga (FEM) sudah sesuai dengan hasil eksperimen.

5. Simpulan

Pemodelan yang dilakukan pada balok BN dan balok GWWG menggunakan *software* berbasis elemen hingga menghasilkan hasil yang cukup dekat dengan yang dihasilkan dari uji laboratorium. Persentase selisih hasil antara pemodelan dan uji eksperimental pada balok BN adalah sebesar 2,94% untuk lendutan, 17,30% untuk regangan beton sisi atas dan 3,00% untuk regangan beton sisi samping. Pola retak yang dihasilkan dari pemodelan dan uji eksperimental menunjukkan pola yang sama yaitu retak lentur. Sementara itu, persentase selisih hasil pada balok GWWG adalah sebesar 30,60% untuk lendutan, 17,42% untuk regangan beton sisi atas dan 8,26% untuk regangan beton sisi samping dan regangan yang didapatkan pada GFRP saat beban sebesar 5145 kg adalah sebesar 0,00119. Kegagalan yang terjadi pada balok GWWG adalah retak lentur dan *debonding*. Retak yang muncul pada balok GWWG

dalam pemodelan terjadi hampir merata di tengah bentang dan *debonding* terjadi di ujung bagian perkuatan yang diakibatkan oleh epoksi resin sudah tidak dapat menahan beban.

Daftar Pustaka

- [1] *Dipohusodo, I.*: Struktur beton bertulang: berdasarkan SK SNI T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1996
- [2] *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
- [3] *Sinaei, H., Shariati, M., Abna, A.H., Aghaei, M., Shariati, A.*: Evaluation of reinforced concrete beam behaviour using finite element analysis by ABAQUS. *Academic Journals*, **7**, 21, 2002-2009. 2012
- [4] *Ginardi, I.P., Anggraini, R., Suseno, H.*: Perbandingan kekuatan lentur balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan CFRP dan GFRP. *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil Univ. Brawijaya* (2), pp. 250-258, **1**, 2, 2014
- [5] *Nalarita, K.*: Studi Perkuatan Lentur Balok Beton Bertulang Menggunakan GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) dan WM (Wiremesh). Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Bandar Lampung, 2019
- [6] *Surahman, R.*: Analisis elemen hingga pada balok beton bertulang dengan perkuatan GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) menggunakan software. Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2020
- [7] *Fauzan, C.*: Studi eksperimental perkuatan balok beton bertulang dengan kombinasi GFRP dan Wiremesh. Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik. Universitas Lampung, Bandar Lampung, 2019
- [8] *Nawy, E.G.*: *Beton bertulang suatu pendekatan dasar*. Refika Aditama, Bandung, 2003
- [9] *Tan, K.H., Saha, M.K.*: Long term deflections of reinforced concrete beams externally bonded with FRP system. *Journal of Composites for Construction*, **10**, 6, 2006
- [10] *Hsu, L.S., Hsu, C.*: Complete stress-strain behaviour of high-strength concrete under compression. *Magazine of Concrete Research*, 46, 1994
- [11] *Torenty J.M., Martius-Hammer T.A.*: CEB-FIP Model Code 1990. Comite Euro International du Beton, London, 1990
- [12] *Lu, X.Z., Teng, J.G., Ye, L.P., Jiang, J.*: Bond-slip models for sheets/plates bonded to concrete. *Engineering Structures*, **27**, 6, 2005, 920-937