

Studi Numerik Perkuatan Balok Beton Bertulang dengan Mengkombinasikan Penggunaan GFRP dan *Wire Mesh* pada Beton Mutu Normal

Nadia Agustina¹⁾
Mohd. Isneini²⁾
Fikri Alami³⁾

Abstract

In this study examined two types of beams, namely reinforced concrete beams without strengthening used as control beams (BN) and reinforced with strengthening combination of GFRP and Wire mesh (GGWW). In modeling concrete and GFRP described as solid elements, then for reinforcing steel and wire mesh model as truss elements and epoxy model as cohesive elements. Interaction given at the interface between reinforcing steel and concrete, epoxy and wire mesh using the embedded region interaction technique, then at the interface strengthening layer and epoxy layer using the tie constraint interaction technique.

Based on the maximum load input of the experimental results, the difference percentage of displacement in the BN beam model is 0.79% of numerical model and experimental while in the GGWW beam model is 31.5%. The crack pattern in the numerical and experimental BN beam models shows the overall flexural crack type and in the GGWW beam model there was a sticking failure between the concrete fiber and strengthening (debonding).

Keywords : strengthening, displacement, strain, debonding.

Abstrak

Pada penelitian ini meneliti dua jenis balok yaitu balok beton bertulang normal tanpa perkuatan yang dijadikan balok kontrol (BN) dan balok beton bertulang dengan perkuatan lentur kombinasi GFRP dan *Wire mesh* (GGWW). Dalam memodelkan beton dan GFRP dideskripsikan sebagai elemen *solid*, kemudian untuk model baja tulangan dan *wire mesh* sebagai elemen *truss* dan model epoksi sebagai elemen *cohesive*. Interaksi yang diberikan pada hubungan antara baja tulangan dan beton serta hubungan antara epoksi dan *wire mesh* 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 lendutan pada model balok BN sebesar 0,79% antara model numerik dan eksperimental kemudian pada model balok GGWW adalah sebesar 31,5%. Pola retak pada model balok BN numerik dan eksperimental menunjukkan tipe retak lentur keseluruhan dan pada model balok GGWW terjadi kegagalan lekatan antara serat beton dan perkuatan (*debonding*).

Kata kunci : perkuatan, lendutan, regangan, *debonding*.

¹⁾ Mahasiswa pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung. Surel: nadiaagus0@gmail.com

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

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

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 pada saat ini, memunculkan metode baru yang dapat mempermudah pekerjaan salah satunya yakni mensimulasi perilaku balok beton bertulang yang diperkuat dengan kombinasi GFRP dan *wire mesh* dengan bantuan *Software*. Data dan hasil dari studi ekperimental yang telah dilakukan dapat juga di evaluasi dengan melakukan pemodelan struktur. Salah satu pendekatan dengan pemodelan yang dapat dilakukan yaitu pendekatan dengan *Software* berbasis simulasi metode numerik elemen hingga (*finite element method*) yaitu *Abaqus*. Memiliki kelebihan yakni dapat memasukkan hasil data eksperimen atau pengujian ke dalam tabel *properties* material sebagai data input material beton yang akurat dan merupakan *Software* yang sudah banyak digunakan dalam desain struktur 3D, maka hal inilah yang menjadi dasar pemilihan penggunaan *Software* tersebut. Hasil pemodelan dari *Software* ini akan divalidasi dengan hasil studi ekperimental yang telah dilakukan oleh Vernanda (2019) yang menggabungkan penggunaan GFRP dan *Wire mesh* dengan variasi lapisan perkuatan 2 *layer* serat *glass* dan 2 *layer wire mesh* dengan notasi GGWW.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Balok Beton Bertulang

Setiawan (2014) mendefinisikan, Balok merupakan elemen horizontal maupun miring yang panjang dengan ukuran lebar serta tinggi yang terbatas. Balok beton polos pada umumnya tidak efisien untuk berfungsi sebagai komponen struktur lentur karena kuat tariknya yang jauh lebih kecil daripada kuat tekannya. Sebagai konsekuensi, balok beton polos tanpa tulangan ini akan mengalami kegagalan tarik pada tingkat beban yang rendah, jauh sebelum beton mencapai kuat tekannya. Untuk alasan inilah maka tulangan baja diletakkan pada bagian penampang yang mengalami tegangan tarik, sedekat mungkin dengan serat tarik terluar dari balok beton.

2.2. Fiber Reinforced Polymer (FRP)

Menurut ACI (2017), Bahan komposit yang terbuat dari serat dalam resin polimer, dikenal dengan *fiber-reinforced polymers* (FRPs) telah muncul sebagai opsi yang layak untuk perbaikan dan perkuatan. Sistem FRP didefinisikan sebagai serat dan resin yang digunakan untuk membuat laminasi komposit, semua resin yang teraplikasi digunakan untuk mengikat ke substrat beton dan semua lapisan yang diterapkan digunakan untuk melindungi bahan penyusunnya. FRP adalah bahan yang ringan, anti karat dan mempunyai kekuatan tarik yang tinggi. Vernanda (2019) dalam penelitiannya, melakukan analisis ekperimental pada balok beton bertulangan diperkuat dengan lembaran GFRP jenis *E-Glass* (SEH 51 A).

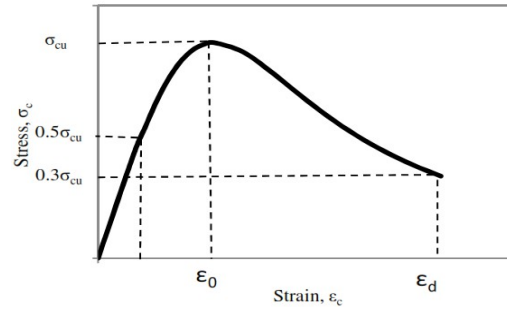
2.3. Wire Mesh

Menurut Amiruddin (2014), *Wire mesh* adalah jaring kawat baja las yang berkualitas tinggi, setiap detil *wire mesh* dibuat dengan pengawasan yang sangat teliti. Dimana mulai dari pemilihan material atau bahan yaitu besi melalui kontrol yang ketat kemudian di las dengan mesin las otomatis yang berteknologi tinggi, sehingga menghasilkan *wire mesh* berkualitas tinggi. Vernanda (2019) dalam penelitiannya, melakukan analisis ekperimental pada balok beton bertulangan diperkuat dengan *Wire mesh* tipe *square welded mesh* (las kotak).

2.4. Parameter Material

2.4.1. Material Beton

Dalam model ini mengasumsikan bahwa ada dua mekanisme kegagalan beton yaitu gagal tarik dan kehancuran tekan. Perilaku tegangan-regangan beton dalam model tekan dimodelkan menggunakan konstitutif hubungan yang mengacu pada Hsu and Hsu (1994).



Gambar 1. Hubungan tegangan-regangan tekan material beton.

$$\sigma_c = \left(\frac{\beta \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o}}{\beta - 1 + \frac{\epsilon_c}{\epsilon_o}} \right) \sigma_{cu} \quad (1)$$

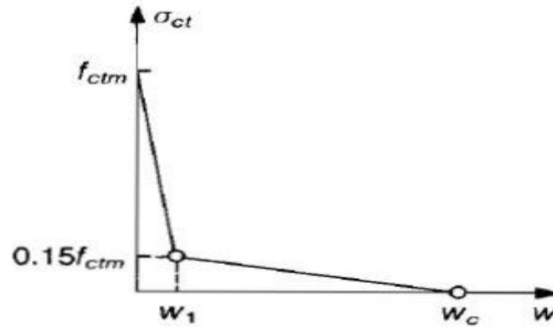
$$\beta = \frac{1}{1 - \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_o \circ E_o}} \quad (2)$$

$$\epsilon_o = 8,9 \times 10^{-5} \sigma_{cu} + 2,114 \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$E_o = 1,2431 \times 10^2 \sigma_{cu} + 3,28312 \times 10^3 \quad (4)$$

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

Metode pendekatan *crack-opening-displacement* digunakan dalam pemodelan respon tarik beton dalam penelitian ini karena metode ini dianggap paling praktis dan sesuai. Konstitutif model menggunakan hubungan *stress-displacement* yang mengacu pada CEB-FIP (1990).



Gambar 2. Hubungan tegangan-regangan tarik material beton.

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

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

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

$$w_c = a_f \frac{G_f}{f_{ctm}} \quad (8)$$

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

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

$$G_f = G_{fo} \left(\frac{f_{cm}}{f_{cmo}} \right)^{0,7} \quad (10)$$

Dimana, nilai f_{cmo} diambil sebesar 10 MPa.

$$f_{cm} = f_{ck} \Delta_f \quad (11)$$

dimana, Δ_f diambil sebesar 8 MPa.

$$f_{ck} = f'_c - 1,6 \quad (12)$$

menentukan parameter kerusakan tekan dalam bentuk tabulasi sebagai fungsi dari regangan inelastis ϵ_c^{in} . Parameter kerusakan tekan d_c dan kerusakan tarik d_t adalah

fungsi dari 1 dikurangi dengan rasio kuat tekan dan kuat tekan puncak. Berdasarkan systemes (2014), regangan inelastis ε_c^{in} dan kerusakan tekan beton d_c dan d_t dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

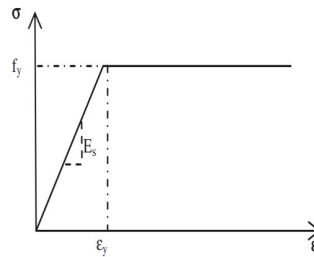
$$\varepsilon_c^n = \varepsilon_c - \varepsilon_{oc}^{el} = \varepsilon_c - \frac{\sigma_c}{E_{co}} \quad (13)$$

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \quad (14)$$

$$d_t = 1 - \frac{f_t}{f_{ctm}} \quad (15)$$

2.4.2. Material Baja Tulangan dan Wire Mesh

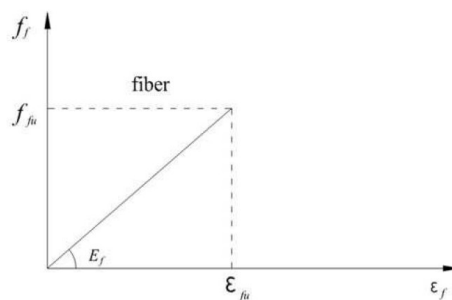
Pemodelan hubungan konstitutif material baja tulangan dan *Wire mesh* diasumsikan mengikuti hubungan tegangan-regangan *elastic perfectly plastic*. Dalam model ini tidak memperhitungkan regangan pengerasan bahan (*strain hardening*).



Gambar 3. Hubungan tegangan-regangan material baja tulangan.

2.4.3. Material GFRP

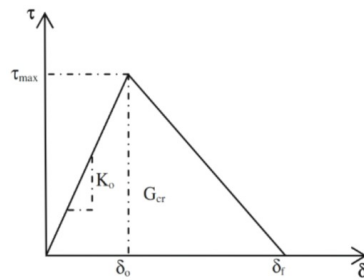
Hubungan tegangan dan regangan material GFRP ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan tegangan-regangan material GFRP.

2.4.4. Material Epoksi

Perilaku tegangan-perpindahan dalam dimodelkan menggunakan konstitutif hubungan yang mengacu pada Lu, et al (2005).

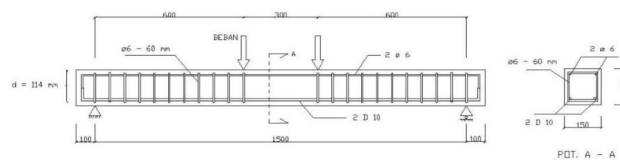


Gambar 5. Hubungan tegangan-regangan material epoksi.

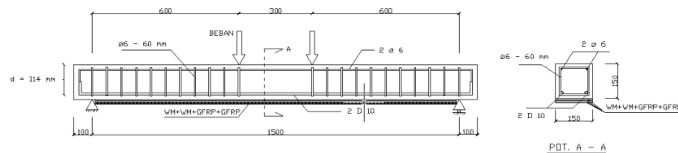
3. METODE PENELITIAN

3.1. Penetapan Model Eksperimental

Penetapan model balok beton bertulang sebagai benda uji adalah balok beton normal dan dengan variasi perkuatan lentur GFRP dan *wire mesh* persegi panjang dengan dua titik beban di atas dengan jarak masing-masing 600 mm dari dua tumpuan sendi dan rol dengan panjang total 1700 mm. Bentang di antara tumpuan sepanjang 1500 mm dengan ukuran tinggi penampang sebesar 150 mm. Detail benda uji dapat dilihat seperti pada Gambar 6 dan 7.



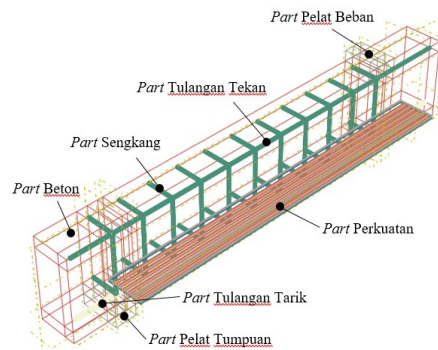
Gambar 6. Balok beton bertulang normal tanpa perkuatan.



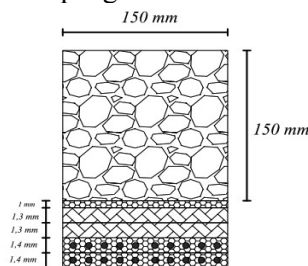
Gambar 7. Balok beton dengan perkuatan GFRP dan Wire mesh.

3.2. Penetapan Model Numerik

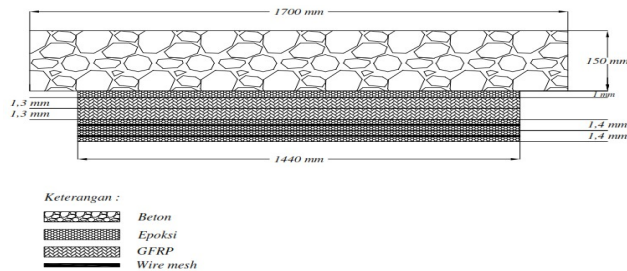
Pada pemodelan, dibuat model pendekatan dengan proses yang sebenarnya di laboratorium. Setelah proses laminasi dengan lem epoksi mengering, selanjutnya komposit perkuatan diberi lem epoksi kembali untuk proses pelekatan dengan struktur balok beton. Khusus pada pemodelan *wire mesh*, hanya memodelkan *wire mesh* pada arah memanjang dengan alasan terbatasnya kemampuan *running* program pada perangkat komputer karenanya proses pemodelan disederhanakan. Hal ini dapat dilakukan karena pada prosesnya, kekuatan *wire mesh* arah memendek dapat diabaikan.



Gambar 8. Pemodelan penampang balok beton bertulang dengan perkuatan.



Gambar 9. Sketsa potongan melintang pemodelan beton dengan lapisan perkuatan.

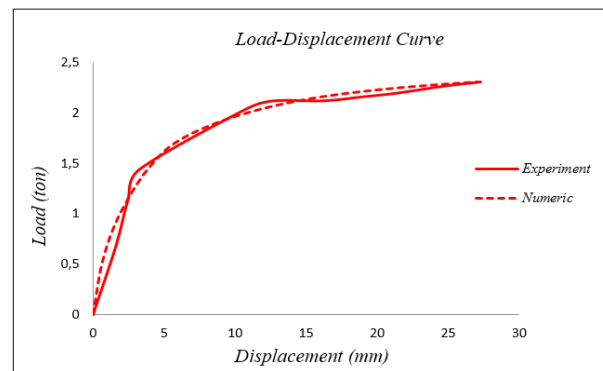


Gambar 10. Sketsa potongan memanjang pemodelan beton dengan lapisan perkuatan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

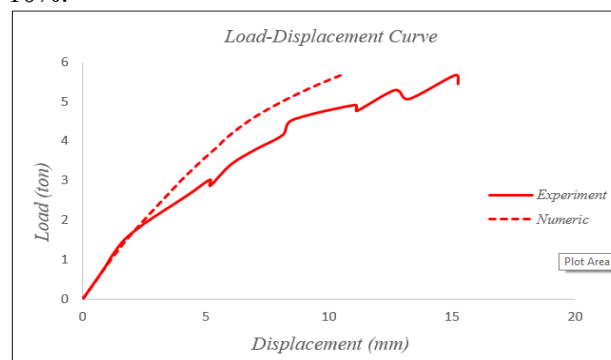
4.1. Hubungan Beban dan Lendutan

Lendutan pada balok normal dengan beban input sebesar 2,307 ton pada simulasi numerik diperoleh nilai sebesar 27,0747 mm sedangkan pada eksperimental diperoleh nilai sebesar 27,29 mm. Saat beban belum mencapai 0,75 ton, balok berada pada kondisi elastis dengan kekakuan dan kekuatan yang tinggi dengan perilaku beban linear dengan lendutan. Simulasi numerik yang dilakukan dengan input nilai beban yang senilai dengan eksperimental menghasilkan besar lendutan dan perilaku lentur yang sangat mirip. Untuk kontrol perbandingan, persentase perbandingan nilai akhir antara hasil eksperimental dan simulasi numerik didapat sebesar 0,79% nilai ini memenuhi batas kontrol perbandingan yang diberikan sebesar 10%.



Gambar 11. Hubungan beban dan lendutan balok BN.

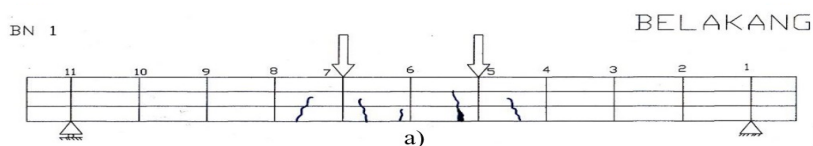
Lendutan pada balok GGWW dengan beban input sebesar 5,675 ton pada simulasi numerik diperoleh nilai sebesar 10,4536 mm sedangkan pada eksperimental diperoleh nilai sebesar 15,26 mm. Simulasi numerik yang dilakukan dengan input nilai beban yang senilai dengan eksperimental menghasilkan besar lendutan dan perilaku lentur yang mendekati namun tidak mencapai lendutan seperti hasil eksperimental. Untuk kontrol perbandingan, persentase rata-rata perbandingan antara hasil eksperimental dan simulasi numerik didapat sebesar 31,5%, nilai ini melebihi batas kontrol perbandingan yang diberikan sebesar 10%.



Gambar 12. Hubungan beban dan lendutan balok GGWW.

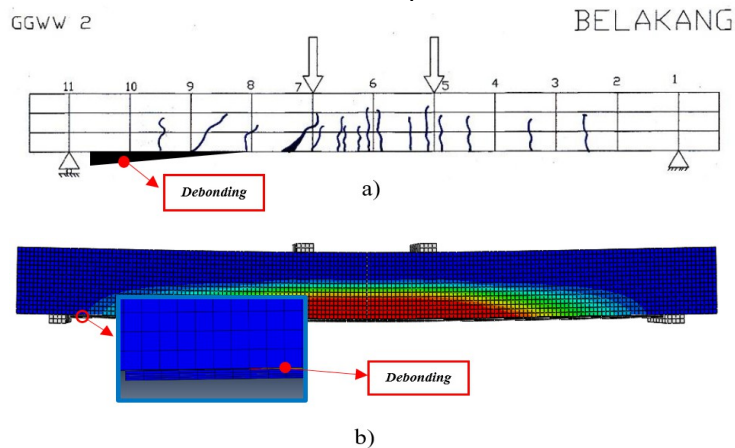
4.2. Pola Keretakan Beton

Pola keretakan dalam pemodelan balok BN mendekati dengan hasil dari studi eksperimental. Tipe retak pada pemodelan adalah retak lentur dengan pola berada di tengah bentang balok. Retak pada balok tidak mencapai pelat beban dan tidak ditemukan kegagalan pada tumpuan.



Gambar 13. Pola retak balok BN a) Eksperimental b) Pemodelan.

Dalam hal ini pemodelan balok GGWW tidak membentuk pola retak pada balok. Hal ini disebabkan oleh penggunaan *viscosity parameter* pada *concrete damage plasticity* dengan input nilai yang cukup besar yaitu 0,52. Hal ini dilakukan mengingat kebutuhan pemodelan yang mengharuskan menambah kekakuan beton sehingga mendekati hasil eksperimental namun konsekuensinya adalah bahwa semakin besar nilai *viscosity parameter* yang digunakan maka keretakan pada model akan menyebar dan tidak membentuk pola retak maka pada pemodelan tidak dapat memprediksi tipe dan jumlah retak pada beton. Retak pada pemodelan hanya ditandai dengan adanya pola warna yang menunjukkan bahwa retakan pada balok-perkuatan merambat sampai pada titik dimana terjadi kegagalan lekatan antara serat beton dan perkuatan.



Gambar 14. Pola retak balok GGWW a) Eksperimental b) Pemodelan.

Pada eksperimental dan pemodelan terjadi mekanisme kegagalan lekatan beton dan perkuatan. Pada pemodelan, dengan input beban sebesar 5,675 ton *complete* sebelum regangan beton mencapai 0,003 dan terjadi kegagalan pada lekatan antara serat beton dan komponen perkuatan yang disebut mekanisme kegagalan *debonding*. Panjang kegagalan lekatan pada pemodelan didapat sejauh 14 cm dari ujung perkuatan, hal ini ditunjukkan dengan terlepasnya elemen *cohesive* yang memodelkan lem epoksi antara serat beton dan komposit perkuatan sedangkan pada eksperimental, didapat panjang *debonding* sejauh 36 cm.

5. KESIMPULAN

Berdasar kepada hasil analisis pemodelan dan beberapa perbandingan dengan hasil eksperimental didapat bahwa persentase lendutan pada model balok dengan perkuatan (GGWW) didapat sangat besar dikarenakan kurangnya parameter material yang digunakan pada pemodelan balok beton dengan perkuatan (GGWW). Hal lain yang dimungkinkan adalah karena ikatan antar komposit (GFRP dan *Wire Mesh*) pada pemodelan diproses dengan menggunakan *tie constraint* (terikat) yang secara efektif menyederhanakan pemodelan, namun tidak dapat dicapai dengan peningkatan beban beton bertulang dan sifat perubahan momen gesekan khususnya pada simulasi slip pada perkuatan. Hal ini dengan mudah dapat menyebabkan hasil yang terdistorsi. Faktor lain yang berkaitan salah satunya adalah konvergensi pada elemen hingga yang berkenaan dengan proses pembagian *mesh* dan berbagai kondisi yang terjadi saat pengujian di kondisi aktual balok beton di laboratorium.

Berdasarkan perilaku lentur yang didapat pada pemodelan balok beton normal (BN) dapat disimpulkan bahwa parameter mekanis material seperti *elastic* dan *plastic properties* yang diterapkan pada pemodelan program sudah sesuai dengan keadaan aktual benda uji namun untuk balok beton-perkuatan (GGWW) harus lebih disesuaikan kembali.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committe 440.2R-17. 2017. *Guide for The Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. ACI Manual of Concrete Practice.
- Amiruddin, AA. 2014. Metode Retrofit dengan Wire Mesh dan SCC untuk Peningkatan Kekuatan Lentur Balok Beton Bertulang. Jurnal. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik. Universitas Hasanuddin, Makasar.
- CEB-FIP. 1990. *CEB-FIP Model Code 1990*. Comite Euro-International du Beton, London.
- Hsu, L.S. and Hsu, C.-T.T. (1994) Complete Stress-Strain Behaviour of High-Strength Concrete under Compression. Magazine of Concrete Research, 46, 301-312.
- Lu, et al. 2005. Bond-Slip Models for Sheets/Plates Bonded to Concrete. Engineering Structures. Vol 27, No. 6 pp 938-950.
- Setiawan, Agus. 2016. *Perancangan Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SNI 2847:2013*. Erlangga, Jakarta.
- Systemes, Dassault. 2014. *ABAQUS/CAE User's Guide*. Dassault Systemes Simulia Corp, USA.
- Systemes, Dassault. 2014. *Analysis User's Guide*. Dassault Systemes Simulia Corp, USA.
- Vernanda, Dedi. 2019. 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.