

PEMODELAN NUMERIK KAPASITAS LENTUR BALOK BETON DENGAN PENULANGAN SERAT BERPOLIMER

Kasih Jhoniper Simanjuntak^{1,*}, Andreas Triwiyono¹, Suprpto Siswosukarto¹

¹Departement of Civil and Environmental Engineering, Universitas Gadjah Mada, 55284, Indonesia

*Corresponding authors: kasih.jhoniper.s@mail.ugm.ac.id

Abstrak: Aplikasi *Fiber Reinforcement Polimer (FRP)* sebagai tulangan menjadi salah satu inovasi baru untuk sistem beton bertulang. *FRP* atau serat berpolimer merupakan material dengan sifat elastis dan mempunyai kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan baja. Selain mempunyai kelebihan sifat mekanika, *FRP* juga memiliki sifat tahan korosi, dan sifat non-magnetik, yang dapat memperlambat deteriorasi material akibat lingkungan. Pemodelan balok bertulangan *FRP* secara numeris dengan *finite element* perlu dibuat untuk menggantikan pengujian ekseperimental. Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan elemen balok lentur dengan perangkat lunak ABAQUS CAE. Dimensi balok 150 mm x 100 mm, panjang 2400 mm dengan tulangan memanjang jenis *glass fiber reinforcement polimer (GFRP)* tekan dan tarik masing - masing 2D10 dan sengkang D4-100 dengan pembebanan statik *four point loading*. Dalam pemodelan digunakan interaksi *perfect bond* antara *GFRP* dan beton sekelilingnya. Untuk validasi pemodelan, kurva beban - defleksi hasil pemodelan dibandingkan dengan kurva beban - defleksi hasil pengujian eksperimental sebelumnya. Hasil model tervalidasi relatif baik dibandingkan hasil eksperimental. Dengan hasil pemodelan yang sudah tervalidasi, beban maksimum model numerik dibandingkan dengan analisis kapasitas lentur nominal SNI 8970 : 2021 sehingga didapatkan rasio perbandingan kapasitas nominal dan beban maksimum model numerik. Diagram beban-defleksi di awal sangat dekat, dengan selisih beban ultimit pada model dengan hasil pengujian lentur balok 12,1%. Perbandingan kapasitas lentur nominal bertulangan *GFRP* berdasarkan SNI 8970:2021 dan beban maksimum model numerik diperoleh 0,5, aman digunakan sebagai acuan perencanaan balok beton bertulangan.

Kata kunci: : *fiber reinforced polimer*, kapasitas lentur, beton bertulang, pemodelan numerik

PENDAHULUAN

Serat berpolimer yang sering disebut *FRP* merupakan salah satu material yang sudah banyak diteliti sebagai tulangan pada struktur beton. Banyak penelitian membahas penggantian beton konvensional bertulangan baja menjadi beton bertulangan *FRP*. *FRP* merupakan material dengan sifat elastis dan mempunyai kuat tarik yang lebih tinggi dibandingkan baja (Arivalagan, 2012; R. Sun et al., 2021). Aplikasi *FRP* sebagai tulangan menjadi salah satu inovasi terbaru untuk sistem struktur beton bertulang. Selain sifat mekanika tersebut *FRP* juga memiliki sifat tahan korosi, tidak konduktif dan memiliki sifat non-magnetik, dikarenakan sifat - sifat tersebut kemungkinan deteriorasi material akibat lingkungan menjadi berkurang (Rolland et al., 2020). Durabilitas jangka panjang dari beton bertulang telah menjadi perhatian dikarenakan deteriorasi akibat korosi baja tulangan (R. Sun et al., 2021; Z. Sun et al., 2021). Batang *FRP* merupakan material non-logam dan elastis lebih tahan terhadap fatik dan degradasi material.

Pertimbangan dalam penggunaan batang *FRP* dalam beton bertulang dapat dilihat pada Tabel 1 (BSN, 2021)

Tabel 1. Karakteristik Batang *FRP* (BSN, 2021)

Karakteristik Batang <i>FRP</i>	
a)	Tahan terhadap klorin dan bahan kimia
b)	Kekuatan Tarik lebih tinggi dari baja
c)	Ringan ¼ hingga 1/5 dari berat batang baja
d)	Tidak terpengaruh medan magnet, gelombang radio (khusus <i>Glass-FRP</i>)
e)	Bersifat non-konduktif baik terhadap temperature atau elektrik (khusus <i>Glass-FRP</i>)
f)	Selimit beton lebih efisien
g)	Kebutuhan campuran (<i>Admixture</i>) untuk mengurangi korosi tidak diperlukan
h)	Ketahanan terhadap fatik yang tinggi
i)	Dapat dengan mudah dibongkar untuk struktur sementara
j)	Memiliki umur layan yang lebih tinggi untuk lingkungan korosif
k)	Penanganan yang lebih baik terhadap kerusakan

Perbedaan antara <i>FRP</i> dan Baja
a) <i>FRP</i> bersifat elastic linier hingga mencapai kegagalan, sedangkan baja mengalami kelelahan
b) <i>FRP</i> Bersifat <i>anisotropic</i> sedangkan baja isotropic
c) Karena modulus batang <i>FRP</i> lebih rendah, desain untuk kemampuan layan sering menjadi penentu dalam proses desain
d) Batang <i>FRP</i> mempunyai ambang rangkai yang lebih rendah dari Baja
e) Koefisien ekspansi termal berbeda untuk arah longitudinal dan radial
f) Ketahanan terhadap api dan aplikasi suhu tinggi lebih rendah dari baja
g) Jika terjadi degradasi pada batang <i>FRP</i> , mekanisme degradasi lebih bersahabat pada beton disekitarnya, tidak seperti baja yang meluas dan menyebabkan kegagalan elemen
Dimana batang <i>FRP</i> harus dipertimbangkan?
a) Setiap elemen beton yang rentan terhadap korosi oleh ion klorida atau senyawa kimia
b) Setiap elemen beton yang membutuhkan kekuatan nonlogam karena gelombang elektromagnetik
c) Sebagai alternatif ekonomis terhadap kekuatan batang epoksi dan galvanis
d) Penghematan terhadap penggunaan batang stainless steel
e) Dimana peralatan konstruksi akan merusak elemen yang diperkuat, khususnya pada pertambangan dan pemboran terowongan
f) Aplikasi yang membutuhkan nonkonduktivitas temperature
g) Pada struktur beton massif yang terpapar klorin laut pada aplikasi gabungan dengan baja

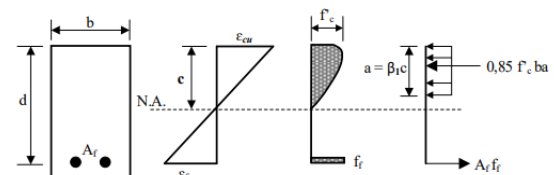
Perbedaan sifat mekanika *FRP* dan baja yaitu batang *FRP* linear tidak menunjukkan kelelahan sampai pada titik fraktur menyebabkan kriteria desain berbeda dibandingkan dengan beton bertulangan baja (BSN, 2021). Jika penulangan *FRP* runtuh, kegagalan komponen akan terjadi tiba-tiba dan tak terduga (Gangarao & Vijay, 1997; Jaeger et al., 1997; Nanni, 1993; Thériault & Benmokrane, 1998). Untuk mencegah keruntuhan mendadak direkomendasikan beton bertulangan *FRP* didesain gagal pada area tekan beton atau kondisi *over reinforced* (Goldston et al., 2016). Kegagalan ini bersifat brittle tetapi lebih diharapkan untuk elemen lentur. Apabila beton mengalami keruntuhan tekan sebelum tulangan *FRP* runtuh tarik, maka batang lentur akan mengalami sedikit perilaku *inelastic*

sebelum hancur (Nanni, 1993). Kondisi *over reinforced* diamati mengurangi defleksi yang terjadi dan meningkatkan kekakuan pada balok (El-Gamal & Abdulsalam, 2010).

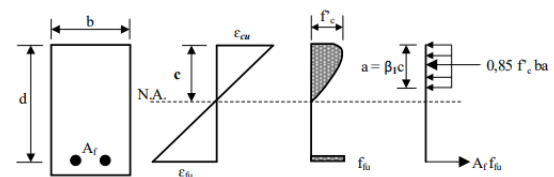
Penelitian ini difokuskan pembahasannya pada kapasitas lentur komponen balok beton bertulangan untuk menguji sifat plastis yang terjadi pada balok dan kriteria desain pada elemen struktur balok beton bertulangan *FRP*. Hasil simulasi numerik dengan menggunakan *software ABAQUS CAE* dibandingkan dengan hasil eksperimen dan desain berdasarkan SIN. Pada penelitian selanjutnya diharapkan simulasi numerik akan menjadi alternatif sebagai pengganti pengujian eksperimental.

Kekuatan Batas Lentur Balok Beton dengan Tulangan *FRP*

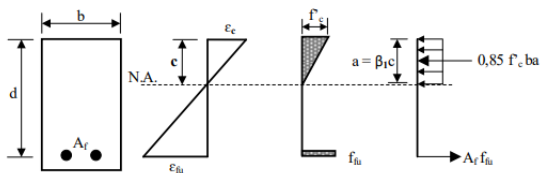
Kekuatan lentur nominal dari komponen beton yang menggunakan tulangan *FRP* dapat ditentukan berdasarkan kompatibilitas regangan, kesetimbangan gaya internal, dan keadaan batas kekuatan kontrol (kondisi beton hancur atau *FRP* runtuh). Gambar 1 memberikan ilustrasi kesetimbangan pada keadaan batas dengan 3 kondisi kegagalan.



a. Kegagalan ditentukan oleh hancurnya beton



b. Kegagalan kondisi seimbang



c. Kegagalan ditentukan oleh keruntuhan *FRP* (tegangan beton bisa tidak linear)

Gambar 1. Kesetimbangan pada keadaan batas (BSN, 2021)

Kondisi batas kontrol hancurnya beton (BSN, 2021)

Ketika $\rho_f > \rho_{fb}$, keadaan batas terjadi akibat hancurnya beton pada area tekan balok. Distribusi tegangan dalam beton dapat diperkirakan dengan blok tegangan segi empat (ACI Committee 318, 2014). Kekuatan lentur nominal dengan rasio penulangan tidak melebihi rasio balans dapat ditunjukkan dalam persamaan

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (1)$$

Kondisi batas seimbang (BSN, 2021)

Ketika $\rho_f = \rho_{fb}$, kondisi kegagalan runtuhnya penulangan FRP terjadi bersamaan dengan hancurnya beton tekan. Distribusi tegangan pada beton tekan bisa diasumsikan dengan blok tegangan segi empat dengan panjang $a = \beta_1 c$ (ACI Committee 318, 2014). Nilai tegangan dan regangan tarik tulangan FRP dipakai pada kondisi runtuh yaitu f_{fu} dan ε_{fu} . Kekuatan lentur nominal dengan rasio penulangan balans dapat ditunjukkan dalam persamaan

$$M_n = 0,85 f'_c a b \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (2)$$

Kondisi batas kontrol keruntuhan FRP (BSN, 2021)

Ketika $\rho_f < \rho_{fb}$, keadaan batas terjadi akibat runtuhnya penulangan FRP. Pada kondisi ini regangan dan tegangan tulangan FRP dipakai pada kondisi runtuh, sedangkan regangan dan tegangan beton serta tinggi garis netral (c) pada saat FRP runtuh belum diketahui. Dengan 2 variabel tidak diketahui maka dilakukan pendekatan batas bawah yang konservatif dimana $\beta_1 c$ terbesar terjadi pada saat regangan beton mencapai nilai 0,003 atau pada saat kondisi $c = c_b$. Dengan pendekatan ini didapatkan persamaan kekuatan lentur sebagai berikut

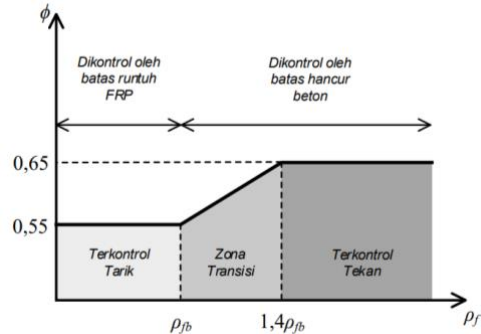
$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (3)$$

$$c_b = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{fu}} d \quad (4)$$

Faktor reduksi kekuatan lentur (BSN, 2021)

Menurut SNI 8970:2021 Faktor reduksi kekuatan untuk lentur dapat dihitung secara grafis oleh gambar dan memberikan faktor 0,65 untuk bagian yang terkontrol tekan dan 0,55 untuk bagian yang dikontrol tarik, dan

menyediakan transisi linier antara kedua kondisi ini (lihat Gambar 2).



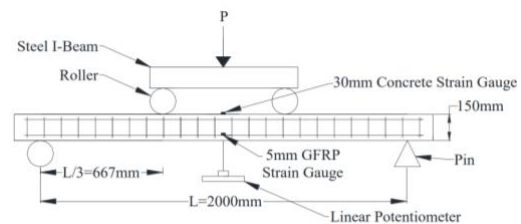
Gambar 2. Grafik faktor reduksi kekuatan lentur (BSN, 2021)

METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini dilakukan dengan beberapa tahapan penelitian, analisis kapasitas berdasarkan lentur balok SNI 8970:2021, pemodelan numerik balok beton bertulang, uji konvergensi mesh, hingga validasi hasil numerik dengan data eksperimen.

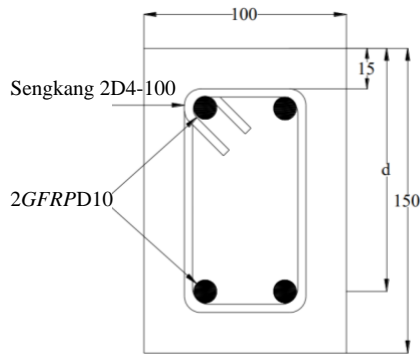
Pemodelan

Pemodelan balok dilakukan dengan perangkat lunak ABAQUS CAE, dengan dimensi, penulangan dan pembebanan pada balok mengikuti pengujian yang dilakukan oleh Goldston et al., (2016). Pembebanan lentur pada balok berupa *four-point bending* sesuai dengan keadaan pengujian dengan jarak antar beban terpusat sebesar $L/3$ atau 667 mm seperti pada Gambar 3.



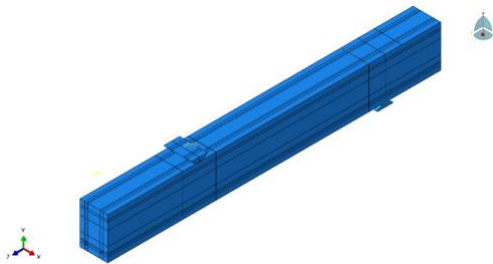
Gambar 3. Pembebanan balok (Goldston et al., 2016)

Penampang balok dimodelkan mengikuti spesimen balok lentur 40-#3-1.0-S Goldston et al., 2016. Kuat tekan beton 40 MPa dengan tulangan tekan dan tarik GFRP 2 D10. Dimensi penampang balok dengan lebar 100 mm dan tinggi 150 mm, selimut bersih balok 15 mm. Panjang total balok 2400 mm dan jarak antar tumpuan 2000 mm. Potongan melintang balok dapat dilihat Gambar 4.

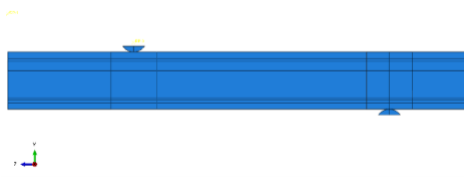


Gambar 4. Detail penampang model balok (Goldston et al., 2016)

Balok dimodelkan dengan panjang setengah dari panjang total, dengan pemilihan *boundary condition* yang cocok. Model diberi penahan arah sumbu Global Z pada tengah bentang sebagai penyesuaian dari model balok bentang penuh. Setengah panjang balok adalah 1200 mm, dengan jarak tengah bentang ke tumpuan sebesar 1000 mm. Model 3D balok beton bertulangan dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Model 3D Balok Setengah Bentang



Gambar 6. Model 2D Balok Setengah Bentang

Sifat mekanika beton dengan kuat tekan 40 MPa dimodelkan berdasarkan persamaan dari penelitian Mander, et al., (1988). Untuk kuat tarik beton dimodelkan secara linier sesuai dengan penelitian dari (Carreira & Chu, 1986). Parameter kerusakan pada beton dimodelkan dengan kriteria *concrete damage plasticity* seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter *Concrete Damage Plasticity* (Dassault Systemes, 2011)

Dilatation angle ψ	Eccentricity	f_{b0} / f_{c0}	K	Viscosity
40	0,1	1,16	0,67	0,00025

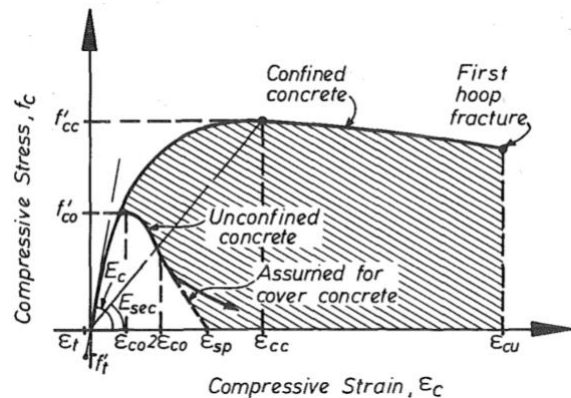
Input persamaan J.B. Mander et al., (1988), tegangan tekan maksimal dalam pemodelan diambil 40 MPa terjadi pada regangan 0,0029. Diagram tegangan regangan tekan pada beton dapat didekati dengan persamaan (5) dan (6). Ilustrasi diagram monotonik tegangan regangan beton tekan pada beton terkekang dan tidak terkekang dapat dilihat pada Gambar 7

Untuk regangan beton $\epsilon_c \leq 2 \epsilon_{co}$

$$f_c = f_{co} * \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} * \frac{r}{r-1+(\epsilon_c/\epsilon_{co})^r} \quad (5)$$

Untuk regangan beton $\epsilon_c > 2 \epsilon_{co}$

$$f_c = f_{2 \epsilon_{co}} + \left(\frac{\epsilon_c - 2 \epsilon_{co}}{\epsilon_{sp} - 2 \epsilon_{co}} \right) * (f_{sp} - f_{2 \epsilon_{co}}) \quad (6)$$



Gambar 7. Diagram tegangan - regangan beton (J.B. Mander et al., 1988)

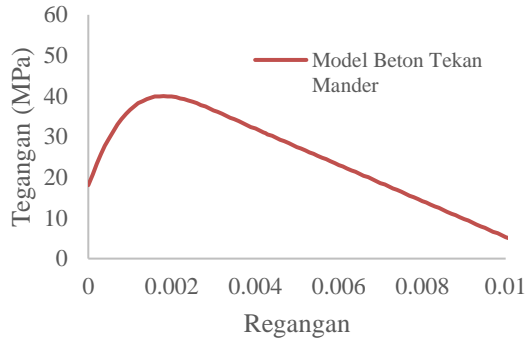
Kriteria *concrete damage plasticity* digunakan dalam pemodelan balok beton bertulangan *GFRP*. Parameter yang diinputkan untuk beton tekan yaitu *compressive behavior* dan *compression damage*. Pada *compressive behavior* tegangan dan regangan dimodelkan setelah kondisi elastis terjadi, sehingga regangan yang dimasukkan merupakan regangan plastis. Parameter beton elastis yang diinputkan adalah *Young Modulus* dan *Poisson Ratio* dengan nilai seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Elastis Beton pada Model

<i>Young modulus (Ec)</i>	$5000\sqrt{f_{c'}} = 31622,78 \text{ MPa}$
<i>Poisson ratio (v)</i>	0,15

Parameter *compressive behavior* yang diinputkan adalah tegangan dan regangan plastis dengan asumsi kondisi plastis beton berada diatas $0,45 f_{c'} = 18 \text{ MPa}$, sehingga regangan beton dianggap plastis setelah 0,000569. Pada pemodelan regangan dibulatkan menjadi 0,0006. Hasil didapatkan diagram monotonik untuk

input parameter *compressive* seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Diagram tegangan regangan plastis beton tekan

Parameter *compression damage* yang diinputkan adalah damage dan regangan plastis dengan asumsi kondisi plastis beton berada diatas 0,45 $f_c' = 18$ MPa, sehingga regangan beton dianggap plastis setelah 0,000569. Pada pemodelan regangan dibulatkan menjadi 0,0006. Perhitungan nilai kerusakan (Df) dapat dihitung sebagai rasio antara tegangan tekan (f_c) dengan tegangan tekan maksimum (f_c')

$$Df = 1 - \frac{f_c}{f_c'} \quad (7)$$

Diagram monotonik tarik beton dimodelkan dengan persamaan *tensile* dari penelitian (Carreira & Chu, 1986). Tegangan tarik maksimal dalam pemodelan diambil sebesar $0,25 \sqrt{f_c'} = 1,5811$ MPa dengan regangan 0,00005. Karakteristik non-linear beton tarik dipengaruhi oleh penyusutan, retak mikro, dan penulangan (Carreira & Chu, 1986). Tegangan regangan beton diprediksi dengan persamaan (Carreira & Chu, 1986) sebagai berikut :

$$f_t = \frac{\beta_t f_t' (\varepsilon_t / \varepsilon_t')}{\beta_t - 1 + (\varepsilon_t / \varepsilon_t')^{\beta_t}} \quad (8)$$

Dengan :

f_t : tegangan tarik (MPa)

β_t : parameter bentuk diagram

f_t' : tegangan tarik maksimum (MPa)

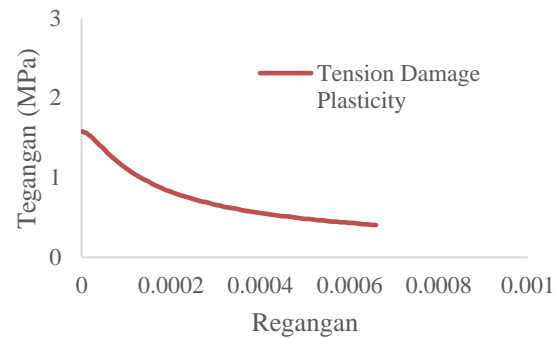
ε_t : regangan tarik

ε_t' : regangan tarik pada saat tegangan = f_t'

Tegangan tarik diasumsikan linear elastis hingga tegangan tarik maksimal. Kondisi plastis terjadi setelah tegangan tarik mengalami penurunan akibat kerusakan tarik (*tension damage*)

Parameter yang diinputkan untuk beton tarik yaitu *tensile behavior* dan *tension damage*.

Pada *tensile behavior* tegangan dan regangan dimodelkan setelah kondisi elastis terjadi, sehingga regangan yang dimasukkan merupakan regangan plastis. Parameter beton elastis yang diinputkan adalah Young Modulus dan Poisson Ratio dengan nilai seperti pada Tabel 2. Parameter *tensile behavior* yang diinputkan adalah tegangan dan regangan plastis dengan asumsi kondisi plastis beton tarik terjadi setelah 1,5811 MPa, sehingga regangan beton dianggap plastis setelah 0,000050. Hasil didapatkan diagram monotonik untuk input parameter *tensile* seperti pada Gambar 9.



Gambar 9. Diagram tegangan regangan tarik beton pasca elastik

Parameter *tension damage* yang diinputkan adalah damage dan regangan plastis dengan asumsi kondisi plastis beton tarik terjadi setelah $0,25 \sqrt{f_c'} = 1,5811$ MPa, sehingga regangan beton dianggap plastis setelah 0,000050. Perhitungan nilai kerusakan (Df) dapat dihitung sebagai rasio antara tegangan tarik (f_t) dengan tegangan tarik maksimum (f_t') dengan persamaan

$$Df = 1 - \frac{f_t}{f_t'} \quad (9)$$

Dalam penelitian ini material baja tulangan digunakan sebagai tulangan geser dengan diameter 4 mm. Data material tulangan geser diambil dari data pengujian yang dilakukan Goldston et al., (2016). Pengujian tarik dilakukan sebanyak tiga kali dengan nilai rerata untuk kuat leleh dan kuat tarik baja masing - masing 615 MPa dan 645 MPa. Dikarenakan tidak adanya data pengujian tarik baja, diagram tegangan-regangan baja tulangan diambil mengikut persamaan dari penelitian yang dilakukan (Park R. & Paulay T., 1975) dengan modulus elastisitas E diasumsikan 200000 MPa dan angka poisson 0,3 regangan strain hardening $e_{sh} = 0,02$ dan regangan fraktur $e_{su} = 0,22$.

Serat berpolimer *GFRP* dimodelkan sebagai tulangan lentur pada balok beton bertulang, material *GFRP* merupakan material yang bersifat elastik dan tidak menunjukkan kelelahan hingga terjadi kegagalan. Data material *GFRP* diambil dari hasil pengujian yang dilakukan Goldston et al., (2016) yaitu spesimen *GFRP#3*, dengan modulus elastisitas $E_f = 55600$ MPa, tegangan dan regangan saat runtuh masing – masing $f_{fu} = 1764$ MPa dan $\varepsilon_{fu} = 0,0318$.

Pembebanan

Dalam penelitian ini dilakukan pembebanan desngan metode *four-point bending*. Beban terpusat dibebankan pada 2 titik simetris sampai terjadi kegagalan akibat lentur murni pada balok beton bertulang. Pada pemodelan pembebanan yang dilakukan berupa beban perpindahan (*displacement load*) yang selalu bertambah hingga terjadi kegagalan pada balok beton bertulang. Beban dimodelkan mengikuti pengujian laboratorium yang dilakukan Goldston et al., (2016), panjang elemen balok adalah 2400 mm, jarak antar tumpuan adalah 2000 mm dan jarak antar tumpuan ke titik beban sebesar $L/3$ atau 667 mm.

Simulasi dilakukan dengan model setengah bentang balok. Balok beton bertulang *GFRP* dibebankan satu beban titik dengan jarak tengah bentang ke titik beban adalah 333 mm, atau $\frac{1}{2}$ jarak antar beban pada Gambar 3. Sebagai penyesuaian dengan model balok bentang penuh, output beban pada diagram P- Δ dikalikan dua. Model pembebanan balok beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Pembebanan balok setengah bentang

Interaksi Beton-Tulangan dengan Ikatan Sempurna (*Perfect Bond*)

Interaksi beton – tulangan *GFRP* dimodelkan ikatan sempurna. Dalam percepatan proses komputasi Tulangan *GFRP* tekan dengan elemen 2D (*wire*) dimodelkan *perfect bond* parameter *embedded region* sedangkan tulangan *GFRP* tarik dengan elemen 3D (*solid*) dimodelkan *surface-surface* dengan parameter ikatan *tie*. Interaksi dimodelkan sebagai ikatan sempurna dimana tulangan dan beton bergerak

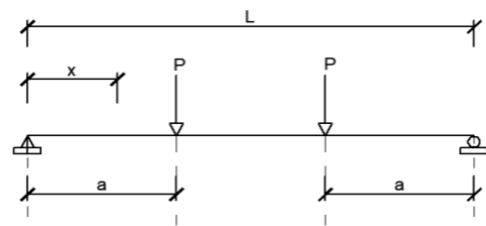
secara bersamaan pada saat terjadinya perpindahan akibat gaya luar.

Uji Konvergensi Mesh

Pada penelitian ini dilakukan uji konvergensi untuk memvalidasi simulasi numerik dan meshing elemen yang dimodelkan. Untuk mempersingkat proses analisis pemodelan dilakukan dengan kondisi linear elastis dengan jumlah mesh elemen yang berbeda. Pemodelan elastis balok beton bertulang *GFRP* yang dipakai dalam uji konvergensi mesh divariasi menjadi 4 model yaitu, model balok beton dengan mesh 20 mm x 20 mm atau jumlah elemen mesh 17000 elemen, model balok beton dengan mesh 15 mm x 15 mm atau jumlah elemen mesh 20119 elemen, model balok beton dengan mesh 10 mm x 10 mm atau jumlah elemen mesh 36992 elemen dan model balok beton dengan mesh 5 mm x 5 mm atau jumlah elemen mesh 135496. Nilai yang dikontrol pada uji konvergensi ini adalah defleksi maksimum yang terjadi yaitu 2 mm. Nilai beban saat defleksi maksimum dibandingkan dengan perhitungan beban manual mengikuti Persamaan $y = \frac{Pa}{24} \times \frac{3L^2 - 4a^2}{EI}$ (10). Sketsa pembebanan four-point bending dapat dilihat pada Gambar 11.

Keterangan:

- y : defleksi maksimum
- P : Beban yang diberikan
- a : Jarak tepi ke titik beban
- E : Modulus Elastisitas Beton
- I : Inersia Balok
- L : Panjang balok



Gambar 11. Pembebanan balok beton

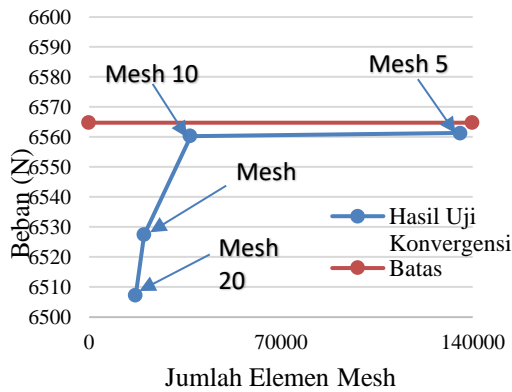
Dari Persamaan (7) dengan nilai $y = 2$ mm didapatkan nilai P sebesar :

$$P = \frac{24y}{a} \times \frac{EI}{3L^2 - 4a^2}$$

$$P = \frac{24 \times 2}{667} \times \frac{32622 \times 28595421.68}{3 \times 2000^2 - 4 \times 667^2}$$

$$P = 6564,803 \text{ N}$$

Hasil uji konvergensi dapat dilihat pada Tabel 4 dan grafik dapat dilihat pada Gambar 12. Dengan menggunakan model meshing 10 mm sudah memenuhi Batasan besar error yang terjadi. Untuk pemodelan nonlinear balok beton bertulangan GFRP dapat digunakan model meshing 10mm x 10mm.



Gambar 12. Grafik Hasil Uji Konvergensi

Tabel 4. Hasil Uji Konvergensi

Tipe Mesh	Jumlah Elemen	Beban pada defleksi 2 mm
20 x 20	17000	6507,304
15 x 15	20119	6527,465
10 x 10	36992	6560,384
5 x 5	135496	6561,383

Validasi Model

Model numerik divalidasi dengan hasil pengujian lentur balok beton bertulangan *GFRP* dalam penelitian (Goldston et al., 2016). Validasi model dilakukan dengan membandingkan kurva P-Δ dan pola keruntuhan model numerik dengan kurva P-Δ dan pola keruntuhan hasil pengujian lentur balok beton bertulangan *GFRP*.

Analisis Kapasitas SNI 8970:2021

Analisis kapasitas nominal dilakukan berdasarkan acuan SNI 8970:2021 tentang perancangan dan pelaksanaan beton struktural bertulangan batang serat berpolimer. Persentase dari kapasitas izin balok dengan beban maksimum dari hasil simulasi dan pengujian diketahui dari analisis ini. Input data analisis kapasitas digunakan berdasarkan spesimen balok uji lentur dan dipakai juga untuk pemodelan numerik. Perhitungan kapasitas lentur balok beton bertulangan *GFRP* dilakukan berdasarkan SNI 8970:2021. Berdasarkan rasio penulangan tarik *GFRP* dan kuat tekan beton

kegagalan yang terjadi pada balok beton bertulang adalah keruntuhan beton tekan. Analisis dilakukan untuk mengetahui batas kontrol serta kegagalan yang terjadi pada balok beton bertulangan *GFRP*.

$$\text{Luas tulangan balans } A_{tb} = C_c / (C_E \cdot F_u)$$

$$A_{tb} = 0,85 \cdot a_b / (0,8 \cdot 1764)$$

$$A_{tb} = 16,59 \text{ mm}^2$$

$$\text{Rasio tulangan balans } r_b = A_{tb} / (d \cdot b)$$

$$\rho_b = 16,59 / (126 \cdot 100) = 0,00132$$

$$\text{Luas tulangan tarik benda uji}$$

$$A_t = n \cdot 22/7 \cdot \pi \cdot D^2 / 4$$

$$A_t = 2 \cdot 22/7 \cdot \pi \cdot 10^2 / 4$$

$$A_t = 157,14 \text{ mm}^2$$

$$\text{Rasio tulangan tarik benda uji } \rho_t = A_t / (d \cdot b)$$

$$\rho_t = 157,14 / (126 \cdot 100)$$

$$\rho_t = 0,0125$$

Perbandingan rasio tulangan tarik dengan rasio balans = $\rho_t / \rho_b = 9,47$ sehingga masuk kategori keruntuhan pada beton tekan. Dari grafik pada Gambar 2 didapatkan bahwa kegagalan yang terjadi dikontrol oleh batas hancur beton, sehingga didapatkan faktor reduksi kekuatan lentur $\phi = 0,65$. Kapasitas momen lentur pada keadaan batas hancur beton dapat dinyatakan dengan persamaan berikut

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,5 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2 \quad (11)$$

Dengan nilai tegangan *GFRP* pada saat beton hancur (f_f), dapat dicari dengan persamaan

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_c)^2}{4} + \frac{0,85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_c} - 0,5 E_f \epsilon_c \right) < f_{fu} \quad (12)$$

Sehingga nilai tegangan didapatkan sebesar 469,2 MPa. Nilai tegangan tulangan *GFRP* diinputkan untuk mendapatkan kapasitas momen lentur balok beton bertulangan. Dari perhitungan didapatkan kapasitas momen lentur (M_n) sebesar 8,49 kNm

$$M_n = \rho_f f_f \left(1 - 0,5 \frac{\rho_f f_f}{f'_c} \right) b d^2$$

$$M_n = 0,0125 \cdot 469 \left(1 - 0,5 \frac{0,0125 \cdot 469}{40} \right) 100 \cdot 150^2$$

$$M_n = 8,49 \text{ kNm}$$

Dengan analisis linear didapatkan beban maksimum yang dapat ditumpu oleh balok beton bertulang (P_n) dapat dihitung dengan persamaan $P_n = M_n / s$, dengan s adalah jarak dari tumpuan ke beban titik.

$$P_n = M_n / s = 8,49 / 0,667$$

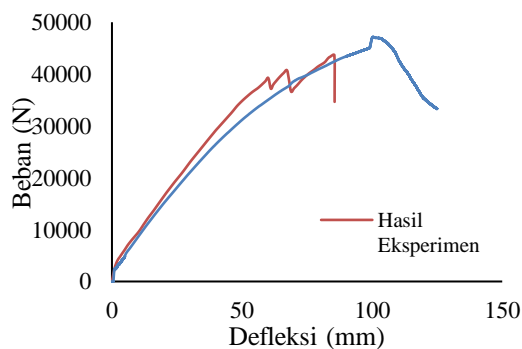
$$P_n = 12,729 \text{ kN dengan beban total}$$

$$P_t = 25,4576 \text{ kN}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

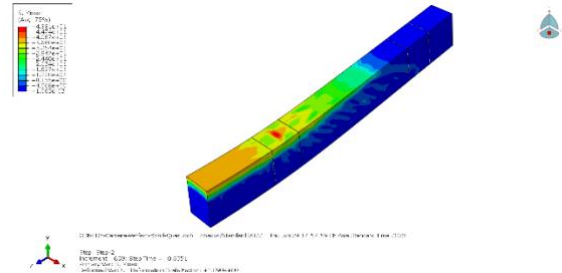
Hasil Simulasi Numerik

Model numerik balok beton bertulangan *GFRP* dibandingkan dengan hasil lentur yang telah dilakukan pada penelitian Goldston et al., 2016. Kurva $P-\Delta$ hasil simulasi dibandingkan dengan kurva $P-\Delta$ hasil pengujian laboratorium. Perbandingan antara kurva $P-\Delta$ hasil numerik dengan kurva $P-\Delta$ hasil eksperimen dapat dilihat pada Gambar 13. Perilaku struktur model numerik dan specimen balok memiliki kesamaan diperlihatkan dari pola *slope* diagram beban – defleksi yang berhimpitan. *Slope* atau rasio kemiringan merupakan rumus dari kekakuan struktur balok beton $k = P/\Delta$, pada defleksi ≤ 50 mm dianggap kekakuan masih linear, hasil didapatkan nilai kekakuan model numerik balok lentur sebesar 716,8 N/mm lebih kecil 9,5% dibandingkan nilai kekakuan balok lentur eksperimen yaitu 792,0 N/mm. Perbedaan kekakuan pada model numerik balok lentur dengan balok lentur eksperimen dapat dilihat jelas setelah kondisi pasca linear, dimana kekakuan balok lentur eksperimen signifikan berkurang dan menurun secara tiba-tiba, sedangkan kekakuan model numerik balok lentur menurun perlahan hingga gagal. Hasil perbandingan didapatkan beban maksimal yang pada simulasi numerik lebih besar 8,1% dibandingkan dengan hasil eksperimen. Pada model numerik beban maksimum yang dapat ditumpu 47,16 kN pada defleksi 100,35 mm sedangkan pada pengujian laboratorium beban maksimum 43,63 kN pada defleksi 85,49 mm.

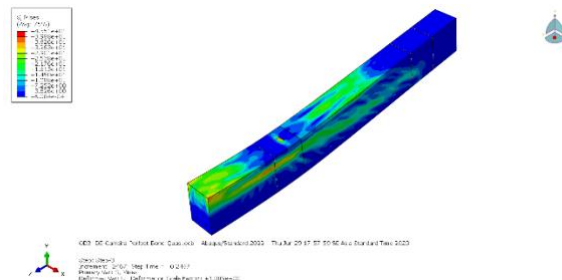


Gambar 13. Perbandingan Grafik $P-\Delta$ Hasil Eksperimen dan Numerik

Saat tegangan maksimum yang terjadi pada beton sudah melebihi kapasitas tekan beton yaitu $f_c' = 40$ MPa, maka penurunan kekuatan dialami beton sehingga terjadi kegagalan tekan beton. Penurunan tegangan pada beton dapat dilihat secara berturut pada Gambar 14 dan Gambar 15.

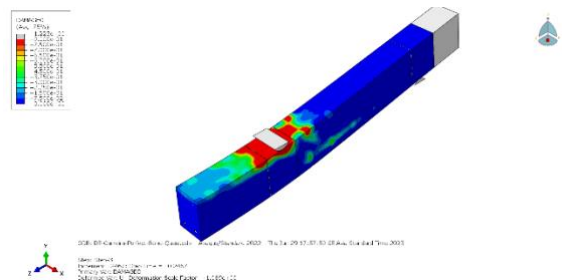


Gambar 14. Tegangan ($t=1,61$) pada balok beton saat mengalami penurunan kapasitas



Gambar 15. Tegangan ($t=2,25$) pada balok beton saat mengalami penurunan kapasitas

Kondisi kegagalan beton dapat dilihat sebagai output ABAQUS CAE yaitu *compression damage ratio* dan *tensile damage ratio*. Kegagalan tekan beton dapat dilihat pada Gambar 16.



Gambar 16. Kerusakan Tekan pada Balok Beton GFRP Interaksi Perfect Bond (Time = 2,25)

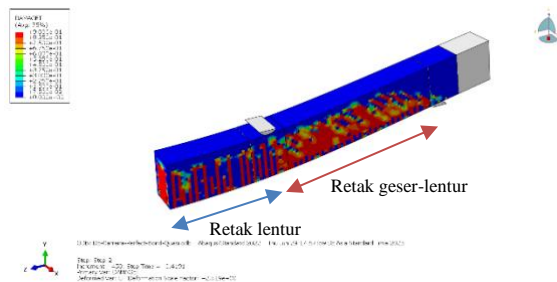
Kegagalan tekan beton dapat ditunjukkan pada daerah kontur berwarna merah. Kerusakan tekan model numerik memiliki kemiripan dengan kerusakan tekan specimen balok. Pada balok uji didapatkan pecah pada beton tekan area sekitar titik beban hingga sampai tengah bentang balok. Hasil model numerik juga ditunjukkan terjadi kerusakan pada area sekitar titik beban

dan tengah bentang. Dapat disimpulkan pola keruntuhan pada model numerik dan hasil uji lentur balok serupa yaitu terjadi pecah pada beton area tekan. Kerusakan tekan pada balok beton hasil pengujian dilihat pada Gambar 17.



Gambar 17. Kerusakan Tekan pada Spesimen Balok Beton

Kerusakan tarik yang terjadi pada beton dapat diambil dari output ABAQUS CAE yaitu tension damage ratio. Kegagalan tarik pada beton ditandai warna merah menunjukkan penurunan kapasitas tarik beton dan retak pada beton akibat beban lentur. Pada model numerik dapat dilihat retak lentur terjadi pada daerah tengah bentang, sedangkan retak geser – lentur terjadi di daerah setelahnya kerusakan tarik pada model numerik dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. Kerusakan Tarik pada Balok Beton GFRP Interaksi Perfect Bond (Time = 1,42)

Perbandingan Dengan Momen Nominal SNI 8970:2021

Beban lentur maksimum perhitungan momen nominal SNI 8970:2021 jauh lebih kecil dibandingkan dengan hasil eksperimen dan hasil pemodelan. Beban lentur hasil perhitungan momen SNI 8970:2021 sebesar 25,458 kN, 46% lebih kecil dari beban hasil pemodelan numerik. Sehingga perhitungan kapasitas lentur SNI 8970:2021 aman digunakan sebagai acuan perencanaan balok beton bertulangan GFRP.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dengan metode elemen hingga dan perhitungan standar SNI 8970:2021 dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Pemodelan numerik dengan interaksi *perfect bond* tervalidasi baik hasil eksperimental, dengan diagram P-Δ pada hasil numerik dan hasil eksperimen mendekati sama. Beban ultimit pada simulasi numerik 8,1% lebih tinggi dibandingkan dengan hasil eksperimen.
2. Beban lentur perhitungan momen nominal SNI 8970 : 2021 masih jauh dibawah beban maksimal hasil eksperimen maupun hasil numerik. Beban lentur didapatkan 25,46 kN atau 46% lebih kecil dari beban maksimum hasil numerik yaitu 47,16 kN

Penelitian selanjutnya perlu dilakukan simulasi material tiap bahan dari interaksi tulangan GFRP dan beton agar perilaku model dapat lebih mirip dengan eksperimental.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14)*.
- Arivalagan, S. (2012). *Engineering Performance of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars and Stainless steel*.
- BSN. (2021). *Keputusan Kepala Badan Standarisasi Nasional Nomor 395/KEP/BSN/9/2021 Tentang Penetapan Standar Nasional Indonesia 8970:2021 Panduan Perancangan Dan Pelaksanaan Beton Struktural Bertulang Batang Serat Berpolimer*. Badan Standardisasi Nasional.
- Carreira, D. J., & Chu, K.-H. (1986). Stress-Strain Relationship for Reinforced Concrete in Tension. *ACI Journal*, 83–3, 21–28.
- Dassault Systemes. (2011). *Abaqus 6.11 Abaqus/CAE Analysis User's Manual*.
- El-Gamal, S. E., & Abdulsalam, B. (2010). Deflection Behavior of Concrete Beams Reinforced with FRP Bars GFRP-reinforced Squat walls View project • Motion Control and Mechanical Wave Study of Nano-machines View project. *The 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1284.6565>
- Gangarao, H. V. S., & Vijay, P. v. (1997). Design of Concrete Members Reinforced with GFRP Bars. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, 1, 143–150.

- Goldston, M., Remennikov, A. M., & Sheikh, M. N. (2016). *Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading*. <http://ro.uow.edu.au/eispapers/5750>
- Jaeger, L. G., Mufti, A., & Tadros, G. (1997). The Concept of the Overall Performance Factor in Rectangular Section Reinforced Concrete Beams. *Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, 2, 551–558.
- J.B. Mander, M. J. N. Priestley, & R. Park. (1988). Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete. *Journal Structural Engineer*, 114(8), 1804–1826.
- Nanni, A. (1993). Flexural Behavior and Design of RC Members Using FRP Reinforcement. *Journal of Structural Engineering*, 119(11), 3344–3359. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1993\)119:11\(3344\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:11(3344))
- Park R., & Paulay T. (1975). Reinforced Concrete Structures. *John Wiley and Sons, Inc.*
- Rolland, A., Argoul, P., Benzarti, K., Quiertant, M., Chataigner, S., & Khadour, A. (2020). Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete. *Construction and Building Materials*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117160>
- Sun, R., Perera, R., Gu, J., & Wang, Y. (2021). A Simplified Approach for Evaluating the Flexural Response of Concrete Beams Reinforced With FRP Bars. *Frontiers in Materials*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmats.2021.765058>
- Sun, Z., Feng, D. C., Sun, Y., Yuan, J., Li, X., & Wei, Y. (2021). Bond-slip behavior of bundled steel/FRP bars and its implementation in high-fidelity FE modeling of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122887>
- Thériault, M., & Benmokrane, B. (1998). Effects of FRP Reinforcement Ratio and Concrete Strength on Flexural Behavior of Concrete Beams. *Journal of Composites for Construction*, 2(1), 7–16. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(1998\)2:1\(7\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(1998)2:1(7))