

PENGARUH CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP) TERHADAP BALOK BETON BERTULANG

Sri Rejeki Laku Utami

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Rekayasa, Universitas Selamat Sri

Email: udhitami@gmail.com

ABSTRACT

The effect of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) on reinforced concrete beams is expected to contribute to increased ductility. In this study five beam specimens. The first test object is a 3D16 Normal beam that is used as a normal beam. The second test object is a 3D16 CFRP beam which is used as a beam with CFRP treatment. The third test object is a 4D16 Normal beam that is used as a normal beam. The fourth test object is a 4D16 CFRP beam that is used as a beam with CFRP treatment. The fifth test object is the 5D16 CFRP beam used as a beam with CFRP treatment. The dimensions of the beams are 150 x 250 mm, with an effective length of 2000 mm. Pembebanan diberikan One Point Loads, untuk melakukan uji lentur maka pembebanan pada balok direncanakan dengan menempatkan satu buah gaya P secara simetris pada jarak $\frac{1}{2}$ L yaitu sebesar 1000 mm. Dan diberikan perlakuan CFRP pada balok 3D16 CFRP sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjangnya 2.000 mm dengan perlakuan CFRP Completely Wrapped Member. From the results of testing the maximum flexural capacity in a row for the 3D16 Normal beam is 104.04 kN while the 3D16 CFRP beam has a maximum increase in bending capacity of 119.52 kN while the 4D16 Normal beam has a maximum bending capacity of 161.28 kN while the 4D16 beam CFRP has a maximum increase in bending capacity of 162.64 kN, while the 5D16 CFRP beam has a maximum increase in flexural capacity of 173.16 kN.

Keyword: CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), Flexural Strength

ABSTRAK

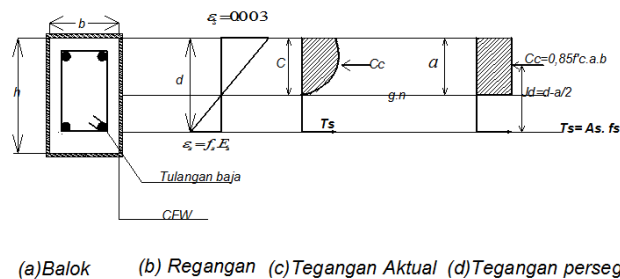
Pengaruh *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* pada balok beton bertulang diharapkan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daktilitas. Pada kajian ini lima buah benda uji balok. Benda uji pertama adalah balok 3D16 Normal yang digunakan sebagai balok normal. Benda uji ke dua adalah balok 3D16 CFRP yang digunakan sebagai balok dengan perlakuan CFRP. Benda uji ke tiga adalah balok 4D16 Normal yang digunakan sebagai balok normal. Benda uji ke empat adalah balok 4D16 CFRP yang digunakan sebagai balok dengan perlakuan CFRP. Benda uji ke lima adalah balok 5D16 CFRP yang digunakan sebagai balok dengan perlakuan CFRP. Dimensi balok – balok tersebut adalah 150 x 250 mm, dengan panjang efektif 2000 mm. Pembebanan diberikan *One Point Loads*, untuk melakukan uji lentur maka pembebanan pada balok direncanakan dengan menempatkan satu buah gaya P secara simetris pada jarak $\frac{1}{2}$ L yaitu sebesar 1000 mm. Dan diberikan perlakuan CFRP pada balok 3D16 CFRP sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjangnya 2.000 mm dengan perlakuan CFRP Completely Wrapped Member. Dari hasil pengujian kapasitas lentur maksimum secara berturut-turut untuk balok 3D16 Normal sebesar 104,04 kN sedangkan pada balok 3D16 CFRP mengalami peningkatan kapasitas lentur maksimum sebesar 119,52 kN sedangkan balok 4D16 Normal memiliki kapasitas lentur maksimum sebesar 161,28 kN sedangkan balok 4D16 CFRP mengalami peningkatan kapasitas lentur maksimum sebesar 162,64 kN, sedangkan balok 5D16 CFRP mengalami peningkatan kapasitas lentur maksimum sebesar 173,16 kN.

Kata kunci: CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer), Kuat Lentur

PENDAHULUAN

Beton bertulang merupakan kombinasi yang baik antara beton dengan baja tulangnya. Beton mempunyai perilaku keruntuhan getas, yaitu keruntuhan yang terjadi secara tiba tiba jika beban yang bekerja sudah melampaui kekuatan bahan, sementara baja mempunyai perilaku keruntuhan daktail, yaitu adanya peristiwa kelelahan sebelum bahan runtuh akibat

pembebanan yang diberikan. Pemberian perkuatan pada elemen balok beton bertulang, berupa perkuatan *CFRP* merupakan salah satu usaha untuk meningkatkan kekuatan, kekauan dan daktilitas beton bertulang. Perkuatan *CFRP* pada balok beton bertulang diharapkan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daktilitas.



Gambar 1. Pengaruh penempatan tulangan baja terhadap jarak jd pada diagram tegangan.

Besarnya kapasitas momen yang dihasilkan oleh beton bertulang salah satunya ditentukan oleh penempatan tulangan baja di dalam beton (jarak *Jd*). semakin besar jarak *Jd* maka kapasitas momen yang dikehendaki dapat bekerja optimal maka tulangan harus diletakkan diserat tarik balok yang paling jauh, dengan kata lain *Jd* diupayakan maksimum, dimana $Jd_2 > Jd_1$ sehingga $M_2 > M_1$ seperti terlihat pada Gambar 1. Pengaruh penempatan tulangan baja terhadap jarak *jd* pada diagram tegangan.

tekan dengan adanya penambahan *CFRP* agar beton terkekang (*external confinement*).

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur bangunan untuk mengalami simpangan pasca elastis yang secara besar berulang kali dan siklik akibat beban gempa di atas beban gempa yang menyebabkan terjadinya pelelahan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekauan yang cukup. Sehingga struktur bangunan gedung tersebut tetap berdiri walaupun sudah berada dalam kondisi plastis. Penambahan tulangan tekan 2Ø6 mm untuk mempengaruhi tulangan tekan sangat kecil dan untuk memperkecil pengaruh tulangan

Pembalutan *CFRP* pada balok beton bertulang diharapkan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daktilitas. Dengan menggunakan model konstitutif (kurva hubungan tegangan-regangan) beton terkekang, dibuat program analisis untuk mengetahui sejauh mana pengaruh Perlakuan *CFRP* terhadap daktilitas balok beton bertulang dan kapasitas penampang balok beton bertulang. Berdasarkan latar belakang permasalahan di atas maka perlu dilakukan kajian tentang “Pengaruh *CFRP* Terhadap Balok Beton Bertulang”. Manfaat yang ingin diperoleh dari kajian ini antara lain bertambahnya wawasan dan pengetahuan dan memahami permasalahan teknologi beton. Khususnya mengenai pengaruh balok beton bertulang oleh *CFRP* terhadap balok beton bertulang. Sebagai masukan standar/Code SNI dan perngaruh *CFRP* pada balok bertulang. Agar eksperimen dapat terarah sesuai tujuan yang diharapkan, dipakai

anggapan dasar dan batasan bahan sebagai berikut:

1. Tulangan yang digunakan adalah sebagai berikut
 - a. Baja ulir diameter 16 mm untuk tulangan tarik

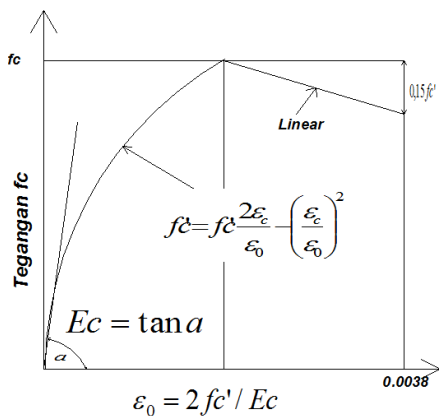
- b. Baja polos diameter 6 mm untuk tulangan tekan.
- c. Baja polos diameter 8 mm dengan jarak 100 mm untuk tulangan geser.

2. Peninjauan dilakukan hanya terhadap perilaku lentur dan geser.

Perilaku Mekanik Beton

Komposisi campuran beton akan mempengaruhi kekuatan tekan beton. Jumlah pasta semen harus cukup untuk membalut seluruh permukaan butiran agregat yang ada. Sifat dan jenis agregat yang digunakan berpengaruh terhadap kuat tekan beton yang tinggi pula. Perilaku kekuatan tekan beton normal dapat

diperlihatkan dengan menggunakan kurva parabola tegangan regangan *Hognestad* terlihat pada Gambar 2. Kurva Parabola Regangan-Tegangan Beton Hognestad untuk beton mutu normal (*Park & Paulay, 1975*) dengan persamaan kuat tekan beton sebagai berikut (*Park & Paulay, 1975*).



Gambar 2. Kurva Parabola Regangan-Tegangan Beton Hognestad untuk beton mutu normal (*Park & Paulay, 1975*).

$$f_c' = \frac{n \cdot f_{co} \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)}{n - 1 + \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \right)^{nk}} \dots\dots\dots (1)$$

Untuk daerah AB ($0 \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{co}$) harga $k=1$

jika $\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \leq 1$ (2)

Untuk daerah BC ($\epsilon_c > \epsilon_{co}$) harga $k= 0,67$

$+ \frac{f_c'}{62}$ Mpa jika $\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} > 1$

$E_c = 3320 \sqrt{f_c'} + 6900$ MPa

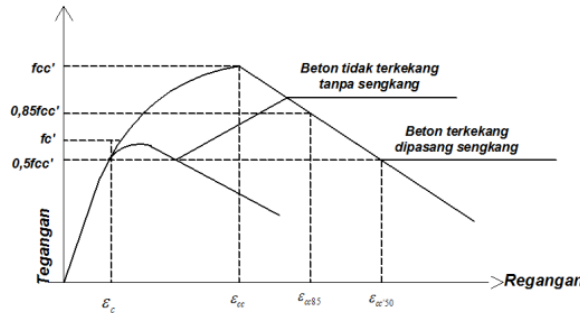
$$\epsilon_{co} = \frac{f_c' \cdot n}{E_c \cdot n - 1} \dots\dots\dots (3)$$

$$n = 0,8 + \frac{f_c'}{17} \text{ MPa} \dots\dots\dots (4)$$

Beton yang dibebani dengan gaya *multiaxial* akan mengalami peningkatan tegangan *axial* dan daktilitas, jika dibandingkan dengan beton yang dibebani gaya uniaxial. Hal ini disebabkan oleh adanya gaya lateral tekan yang diberikan oleh kekangan (*confinment*) pada beton tersebut. Gaya lateral tekan ini akan menahan deformasi lateral beton apabila diberikan gaya *axial*. Selain meningkatkan

kapasitas axial, tegangan lateral yang bekerja pada beton akan meningkatkan daktilitas kolom tersebut. Deformasi dari beton yang mengalami retak akan meningkatkan daktilitas kolom tersebut. Deformasi dari beton yang mengalami

retak akan terhambat karena adanya tekanan lateral kekangan, sehingga kurva tegangan- regangan beton akan menunjukkan penurunan yang lebih landai setelah puncak.



Gambar 3. Grafik tegangan-regangan beton terkekang dan beton tidak terkekang.

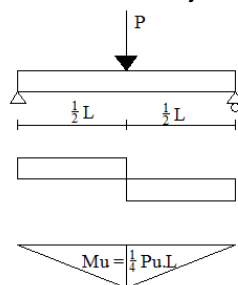
Pada Gambar 3. Grafik tegangan-regangan beton terkekang dan beton tidak terkekang, terlihat bahwa pada tegangan awal modulus elastis beton terkekang dengan beton tidak terkekang hampir sama berarti pada tegangan awal tersebut, tulangan lateral belum aktif memberikan tahanan lateral. Deformasi lateral yang disebabkan oleh beban aksial yang bekerja pada beton, mendapatkan tahanan dari ikatan antara partikel beton "Poisson Ratio" yang merupakan perbandingan antara deformasi lateral dengan aksial antara beton terkekang dengan beton tidak terkekangpun sama.

(kurva hubungan tegangan-regangan beton) untuk beton normal yang sering digunakan dalam analisis beton bertulang adalah kurva hubungan tegangan-regangan *Hognestad*. Pendekatan umum digunakan pada model kurva hubungan tegangan-regangan beton sebelum mencapai tegangan maksimumnya adalah berbentuk parabola berderajat dua. Walaupun demikian bagian awal kurva dianggap linear sampai tegangan beton $0,5 fc'$. Kemiringan garis lurus bagian awal kurva (pada daerah elastis) didefinisikan sebagai modulus elastisitas E_c . Untuk kurva hubungan tegangan-regangan *Hognestad*.

Model konstitutif beton (kurva hubungan tegangan-regangan beton) yang menggambarkan perilaku beton, biasanya diperoleh dengan menerapkan beban tekan aksial pada benda uji beton seperti kubus beton, dapat juga digunakan dengan menerapkan koefisien konversi yang sesuai. Salah satu model konstitutif beton

Kapasitas Lentur

Kapasitas lentur adalah lentur yang terjadi pada balok dengan mengkondisikan gaya lintangnya sama dengan nol, yaitu dengan meletakkan balok beton pada tumpuan sederhana yang dibebani secara simetris sejauh $\frac{1}{2} L$ dari tumpuan (Prihadi, 2016).



Gambar 4. Pola Pembebanan

$$C_c = T_s \Rightarrow C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot a \cdot b \quad \dots(5)$$

$T_s = A_s \cdot f_s = A_s \cdot f_y$. $c_b = 0,003 \cdot d / (0,003 + \epsilon_s$ bila $\epsilon_s = f_y / E_s$ dengan $E_s = 200.000$ Mpa, maka $c_b = 600 \cdot d / (600 + f_y) \quad \dots(6)$

$a \cdot b = \beta_1 \cdot c_b$; bervariasi misalnya $\beta_1 = 0,85$ untuk $f_c' \leq 30$ MPa $\dots(7)$

$a \cdot b = \beta_1 \cdot 600 \cdot d / (600 + f_y)$; agar penulangan liat $\dots(8)$

maka digunakan $\Rightarrow a = 0,75 \cdot a \cdot b = \beta_1 \cdot 450 \cdot d / (600 + f_y)$, a merupakan fungsi dari d (β_1 dan f_y diketahui) $\dots(9)$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a \quad \dots\dots(10)$$

$$M_n = T_s (d - \frac{1}{2} \cdot a) = C_c (d - \frac{1}{2} \cdot a) = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a (d - \frac{1}{2} \cdot a) \quad \dots\dots(11)$$

Bila M_n disamakan dengan M_u/ϕ dan memasukkan a kedalam persamaan terakhir maka akan di dapatkan fungsi kuadrat dalam d bila b ditetapkan untuk mendapatkan nilai ukuran tampang balok.

Daktilitas

Daktilitas merupakan kemampuan struktur atau sub-struktur untuk menahan respon inelastik yang dominan dalam memikul beban agar tidak runtuh.

Macam-macam daktilitas menurut *Paulay & Priestly (1992)* antara lain adalah

- a. Daktilitas kelengkungan (*Curvature Ductility, μ_ϕ*) merupakan perbandingan sudut kelengkungan (*Angle Of Curvature*) maksimum dengan sudut kelengkungan leleh elemen struktur akibat momen lentur. $\mu_\phi = \frac{\phi_{u, \max}}{\phi_y}$

- b. Daktilitas perpindahan (*Displacement Ductility*), merupakan

perbandingan perpindahan (*deformasi*) maksimum struktur (*arah lateral*) dalam kondisi *Post-Elastic* terhadap perpindahan deformasi struktur saat leleh.

$$\mu = \frac{\Delta u, \max}{\Delta y} \quad \dots\dots\dots(12)$$

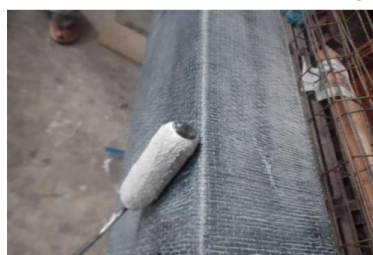
CFRP

CFRP merupakan bahan perkuatan lentur dan dipasang pada permukaan bawah balok. Material CFRP biasanya digunakan sebagai perkuatan geser, baik pada kolom maupun balok. Namun, demikian berdasarkan sifat mekanis yang dimilikinya CFRP mempunyai kuat tarik yang sangat tinggi.

Tabel 1. Karakteristik material *Sika Wrap Hex 231 C*

<i>Properties</i>	<i>Sika Wrap</i>
<i>Tensile Strength</i>	4.800 N/ mm ²
<i>E – Modulus</i>	234.000 N/ mm ²
<i>Elongation at break</i>	>1.8%
<i>Fabric Design Thickness</i>	0,131 mm(based on fibre content)
<i>Width</i>	500 mm
<i>Fabric Length / roll</i>	100 m

Sumber: *PT. Sika Nusa Pratama Cabang Semarang.*



Gambar 5. Cara Pemakaian CFRP jenis Sika Hex 231 C.

Bahan Epoxy (Perekat)

Penggunaan *CFRP* sebagai tulangan eksternal pada struktur beton memerlukan bahan pengikat agar diperoleh aksi komposit antara beton dan *CFRP*. Data teknis tentang *epoxy adhesives* merupakan data sekunder dari PT. Sika Nusa Pratama selaku produsen. Perekat yang dipakai adalah *epoxy adhesives* jenis

Sikadur®-330, yang terdiri dari dua komponen, yaitu komponen A yang berwarna putih dan komponen B yang berwarna abu-abu tua. Perbandingan antara campuran komponen A: komponen B adalah 4:1 dan warna setelah tercampur adalah abu-abu terang. Konsumsi perekat (bahan A + bahan B) sebesar 1.30 ± 0.1 kg/l (*part A+B*) (*at +23°C*) (*evacuated*) yang di oleskan pada permukaan beton.



Gambar 6. *Epoxy adhesives* jenis *Sikadur*®-330.

Prihanantio dan Pangestuti (2006) mengungkapkan bahwa untuk melakukan penelitian dengan *CFRP* yang dilakukan dengan 4 buah benda uji yaitu 1 buah balok uji sebagai balok kontrol tanpa perkuatan (BK) dan 3 buah balok yang lain diberi *CFRP* dengan variasi yang berbeda yaitu *BCFRP-½ b*, *BCFRP-b*, dan *BCFRP-U*. Balok beton bertulang bentang 2000 mm dengan lebar 150 mm dan tinggi 250 mm. Benda uji terbuat dari beton dengan kuat tekan $f_c' = 34,4$ Mpa. Dua buah tulangan tarik diameter 10mm ($2\emptyset 10$ mm) dengan tegangan leleh $f_y = 340$ Mpa ditempatkan dalam kedalaman 203,5 mm. Perkuatan lentur dengan *CFRP* selebar $\frac{1}{2}$ b (*BCFRP-½ b*) pada bagian sisi tariknya menyebabkan kenaikan kapasitas momen sebesar 72,22%, daktilitas naik sebesar 119,3% terhadap balok kontrol dan efektifitas *CFRP* sebesar 36 %. Perkuatan lentur dengan *CFRP* selebar b (*BCFRP-b*) pada bagian sisi tariknya menyebabkan kenaikan momen sebesar 91,71%, daktilitas balok naik sebesar 233,33%

terhadap BK. Efektifitas *CFRP* sebesar 48,67%. Perkuatan *CFRP* model U (*BCFRP-U*) dapat meningkatkan kapasitas momen sebesar 8,33% daktilitas balok naik sebesar 7,72 % terhadap BK. Efektifitas *CFRP* sebesar 1,33 %. Maka Perkuatan lentur menggunakan *CFRP* dapat meningkatkan kapasitas lentur balok. Namun *BCFRP-b* yang paling signifikan jika dibandingkan terhadap BK. Pada *BCFRP-U* pemasangan *CFRP* model tersebut sangat tidak efektif, karena seratnya searah dengan pola retak yang terjadi pada balok. Pada *eksperimen* ini *CFRP* mengalami putus pada daerah geser baik pada *BCFRP-½ b* maupun *BCFRP-b*. Hal ini dikarenakan ketika beton runtuh *CFRP* mendapatkan hentakan secara tiba tiba sehingga mengakibatkan putus. Dalam hal ini dikatakan bahwa *Epoxy* cukup kuat menahan beban sehingga tidak terjadi debonding antara beton dengan *CFRP* (Prihanantio dan Pangestuti, 2006).

METODE

Pada tahap ini dilakukan perencanaan balok uji, perencanaan *Set Up* pembebanan, dan perhitungan beban rencana yang akan bekerja pada struktur balok beton bertulang. Balok uji terbuat dari beton dengan kuat tekan beton rata-rata hasil mix design $f'c = 30$ Mpa. Balok uji mempunyai penampang persegi dengan ukuran lebar 150 mm, tinggi 250 mm dan bentang 2000 mm. Dengan tulangan tarik dengan diameter 16 mm (3 \varnothing 16), (4 \varnothing 16) dan (5 \varnothing 16 CFRP) diletakan dengan kedalaman 203,5 mm. Tulangan tarik yang digunakan adalah tulangan ulir dengan tegangan leleh (f_y) sebesar 409,3438 MPa. Penulangan direncanakan dengan rasio luas tulangan (ρ) lebih kecil dari rasio penulangan maksimum ($\rho \leq 0,75 \rho_b$) yang memenuhi persyaratan sistem tulangan *underreinforced*. Sedangkan material komposit CFRP ditambahkan pada balok uji *eksternal*, CFRP dipasang pada permukaan bawah bahan. Agar terjadi keruntuhan lentur maka di daerah geser balok diperkuat dengan tulangan geser yaitu dengan menempatkan begel- begel yang berinterval 100 mm. Begel tersebut menggunakan tulangan polos dengan diameter 8 mm.

Guna mendapatkan beban rencana pada pengujian lentur balok maka dilakukan analisa perhitungan kapasitas penampang balok bertulang tunggal. Pada analisa tersebut balok mempunyai dua bahan yang berbeda yang akan menahan gaya yang berbeda, yaitu beton menahan gaya tekan sedangkan tulangan baja menahan gaya tarik. Momen kapasitas penampang balok dihitung dari kopel momen gaya-gaya dalam tersebut. Setelah besarnya momen kapasitas penampang diketahui, maka besarnya beban luar dapat dihitung dan dipakai sebagai beban rencana balok.

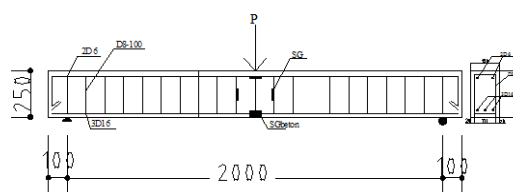
Pemasangan CFRP pada balok 3D16 dengan perlakuan CFRP, balok 4D16 CFRP serta balok 5D16 sepanjang 600 mm (2,4 h) di tengah bentang yang

panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) dengan pemasangan CFRP *Completely Wrapped Member*. Benda uji berupa balok bertulang yaitu 8 silinder beton normal, 1 silinder beton yang diperkuat dengan CFRP , 2 Balok Normal, 2 Balok yang diperkuat dengan CFRP.

Tabel 2. Variabel Pengujian Benda Uji

No	Benda Uji	Perlakuan
1.	1 Balok Normal dengan Tulangan tarik 3D16	Tanpa CFRP
2.	1 Balok dengan Tulangan tarik 3D16	Diperkuat dengan CFRP
3.	1 Balok Normal dengan Tulangan tarik 4D16	Tanpa CFRP
4.	1 Balok dengan Tulangan tarik 4D16	Diperkuat dengan CFRP
5	1 Balok dengan Tulangan Tarik 5D16	Diperkuat dengan CFRP.

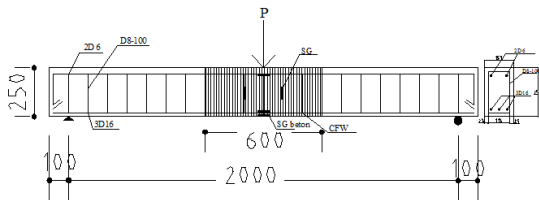
- a. Balok Beton Normal 3D16 (Tanpa Perkuatan CFRP).
Balok Beton Normal 3D16 (Tanpa Perkuatan CFRP) ini menggunakan tulangan lentur 3D16 mm, tulangan sengkang $\varnothing 8$ mm – 100 mm, dan Tulangan Tekan 2 $\varnothing 6$ mm. Adapun untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 7. Balok Beton 3D16 Normal.



Gambar 7. Balok Beton 3D16 Normal.

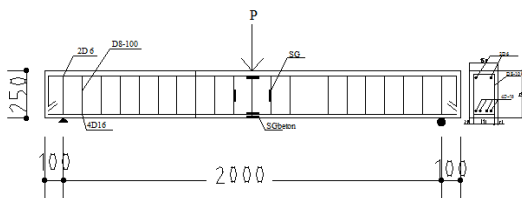
- b. Balok Beton 3D16 dengan Perlakuan CFRP.
Balok Beton 3D16 dengan perlakuan CFRP ini menggunakan tulangan lentur 3D16 mm, tulangan sengkang $\varnothing 8$ mm – 100 mm, dan Tulangan Tekan 2 $\varnothing 6$ mm. CFRP dipotong- potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada kajian ini ukuran CFRP dari PT. Sika Nusa Pratama

memiliki panjang 550 mm dan lebar 100 mm. Pemasangan CFRP sepanjang 600 mm (2,4h) dari bentang akan tetapi dikarenakan panjang CFRP 550 mm akan mengalami pengurangan sebesar 50 mm dilakukan penambahan sebesar 100 mm agar pemasangan CFRP sesuai dengan perencanaan. Dan diberikan pemasangan CFRP pada balok 3D16 CFRP sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) dengan pemasangan CFRP *Completely Wrapped Member*, untuk mengantisipasi pembentukan sendi plastis seperti pada Gambar di bawah. Balok Beton 3D16 dengan perlakuan CFRP.



Gambar 8. Balok Beton 3D16 dengan perlakuan CFRP

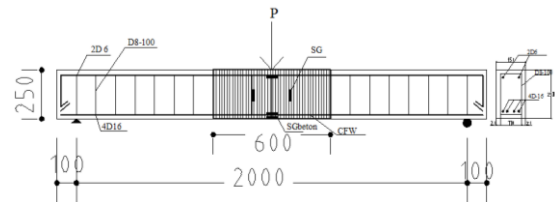
- c. Balok Beton 4D16 Normal (Tanpa Perlakuan CFRP). Balok Beton 4D16 Normal (tanpa perlakuan CFRP) ini menggunakan tulangan lentur 4D16 mm, tulangan sengkang $\varnothing 8$ mm – 100 mm, dan Tulangan Tekan $2\varnothing 6$ mm. Adapun untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar di bawah. Balok Beton 4D16 Normal (tanpa perlakuan CFRP).



Gambar 9. Balok Beton 4D16 Normal.

- d. Balok Beton 4D16 dengan Perlakuan CFRP. Balok Beton 4D16 dengan perlakuan CFRP ini menggunakan tulangan lentur

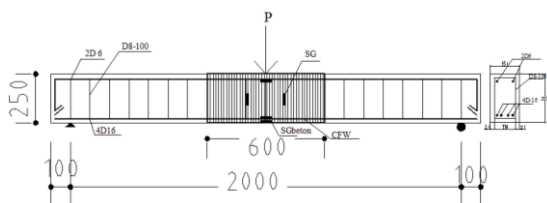
4D16 mm, tulangan sengkang $\varnothing 8$ mm-100 mm, dan Tulangan Tekan $2\varnothing 6$ mm. CFRP dipotong- potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada kajian ini ukuran CFRP dari PT. Sika Nusa Pratama memiliki panjang 550 mm dan lebar 100 mm. Pemasangan CFRP sepanjang 600 mm (2,4h) dari bentang akan tetapi dikarenakan panjang CFRP 550 mm akan mengalami pengurangan sebesar 50 mm dilakukan penambahan sebesar 100 mm agar pemasangan CFRP sesuai dengan perencanaan. Dan diberikan pemasangan CFRP pada 4D16 CFRP sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) dengan pemasangan CFRP *Completely Wrapped Member*, untuk mengantisipasi pembentukan sendi plastis seperti pada Gambar 10. Balok Beton 4D16 dengan perlakuan CFRP.



Gambar 10. Balok Beton 4D16 dengan Perlakuan CFRP

- e. Balok Beton 5D16 dengan Perlakuan CFRP. Balok Beton 5D16 dengan perlakuan CFRP ini menggunakan tulangan lentur 5D16 mm, tulangan sengkang $\varnothing 8$ mm-100 mm, dan Tulangan Tekan $2\varnothing 6$ mm. CFRP dipotong- potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada kajian ini ukuran CFRP dari PT. Sika Nusa Pratama memiliki panjang 550 mm dan lebar 100 mm. Pemasangan CFRP sepanjang 600 mm (2,4h) dari bentang akan tetapi dikarenakan panjang CFRP 550 mm akan mengalami pengurangan sebesar 50 mm dilakukan penambahan sebesar 100 mm agar pemasangan CFRP sesuai dengan perencanaan. Dan diberikan pemasangan CFRP pada 4D16 CFRP sepanjang 600 mm

(2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) dengan pemasangan *CFRP Completely Wrapped Member*, untuk meng-antisipasi pembentukan sendi plastis seperti pada Gambar 11. Balok Beton 5D16 dengan perlakuan *CFRP*.



Gambar 11. Balok Beton 5D16 dengan Perlakuan *CFRP*

Pemasangan *Strain Gauge*

Guna mengetahui besarnya regangan pada beton, tulangan maupun *CFRP* dilakukan pemasangan *Strain gauge* pada bahan bahan tersebut di balok uji. *Strain gauge* yang dipakai dalam kajian ini terdiri dari dua macam yaitu type PL-60-11 dengan Panjang 60 mm yang dipakai untuk mengukur regangan beton dan type FLA - 11 dengan panjang 6 mm yang dipakai untuk mengukur regangan *CFRP*, type ini juga bisa diapakai untuk mengukur regangan baja. Untuk mengetahui regangan beton, *strain gauge* dipasang pada permukaan beton bagian atas sisi tekan, sedang untuk *CFRP* dipasang pada permukaan bawah sisi tarik. Pada tempat tempat yang akan dipasang *strain gauge* permukaannya harus rata dan halus serta bersih dari kotoran. Semua kabel- kabel dari *strain gauge* dihubungkan ke *Data Logger*. Nilai regangan yang terjadi pada *strain gauge* dibaca lewat *Data Logger*, pemasangan *strain gauge* pada benda uji adalah sebagai berikut:

a. Balok Normal adalah Balok beton bertulang sebagai balok kontrol yang terdapat pada balok beton normal 3D16 Normal dan 4D16 Normal. Balok Normal ini akan dibandingkan dengan data – data dari balok uji yang dipasang dengan *CFRP* yang terdapat pada balok 3D16 *CFRP* dan balok 4D16 *CFRP* dan 5D16 *CFRP*, sehingga dapat diketahui perbedaannya. Pada balok normal *strain gauge* terpasang pada dua material yaitu beton dan tulangan baja. *Strain gauge* 1 dipasang

pada permukaan serat tekan balok yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada baja tulangan tekan (ϵ_s'), 1 *strain gauge* dipasang pada baja tulangan tarik (ϵ_s) yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada baja tulangan tarik, 2 *strain gauge* dipasang pada tulangan baja sengkang yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada tulangan sengkang, dan 1 *strain gauge* dipasang pada beton tarik yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada beton tarik. Nilai regangan tarik tulangan baja dipakai untuk membuat grafik beban- regangan ($P-\epsilon$) dari kedua bahan tersebut, sehingga dapat diketahui perilaku tulangan baja selama pembebanan berlangsung dan kondisi saat tulangan mulai leleh.

b. Balok *CFRP* adalah Balok beton bertulang sebagai balok perlakuan dengan pembalutan *CFRP* yang terdapat pada balok beton *CFRP* 3D16 *CFRP*, 4D16 *CFRP* dan 5D16 *CFRP*. Balok *CFRP* ini akan dibandingkan dengan data – data dari balok uji yang tidak dipasang dengan *CFRP* yang terdapat pada balok 3D16 Normal dan balok 4D16 Normal, sehingga dapat diketahui perbedaannya. Pada Balok *CFRP strain gauge* terpasang pada dua material yaitu beton dan tulangan baja. *Strain gauge* 1 dipasang pada permukaan serat tekan balok yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada baja tulangan tekan (ϵ_s'), 1 *strain gauge* dipasang pada baja tulangan tarik (ϵ_s) yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada baja tulangan tarik, 2 *strain gauge* dipasang pada tulangan baja sengkang yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada tulangan sengkang, dan 1 *strain gauge* dipasang pada permukaan beton yang dipasang *CFRP* yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada beton tarik yang dipasang dengan *CFRP*. Nilai regangan tarik tulangan baja dipakai untuk membuat grafik beban-regangan ($P-\epsilon$) dari kedua bahan tersebut, sehingga dapat

diketahui perilaku tulangan baja selama pembebanan berlangsung dan kondisi saat tulangan mulai leleh.

Pelaksanaan Pengecoran

Pengecoran benda uji balok beton bertulang menggunakan ready mix berasal dari PT. Jati Kencana Beton. Pengecoran berlangsung di Laboratorium Bahan Universitas Diponegoro. Campuran beton segar dengan mutu f_c' 30 MPa sebanyak 0,5 m³ dalam satu kali adukkan truk *mixer* dimasukkan ke dalam bekisting yang sudah diisi dengan rakitan tulangan utama dan tulangan sengkang. Sebelumnya, dilakukan kontrol uji nilai slump pada beton *ready mix* terlebih dahulu dan dilanjutkan dengan penuangan beton ke dalam bekisting balok.

Perawatan Benda Uji

Perawatan dilakukan secara rutin dengan menutupi benda uji balok beton bertulang dengan karung basah dan menyiraminya setiap saat sampai berumur 28 hari. Sedangkan untuk benda uji silinder dibuka 24 jam kemudian di rendam ke dalam bak air.

Pemasangan CFRP Pada Benda Uji Persiapan Balok

Pemasangan CFRP dilakukan pada balok yang telah kering (kadar air 0%). Selain itu, permukaan beton yang akan ditempel CFRP harus kasar agar rekatan lem dengan beton dapat lebih maksimal. Balok beton yang bebas air, digosok permukaannya dengan sikat baja untuk memperkasas permukaan balok. Setelah itu dilakukan penghalusan pada sisi siku balok. Sisi siku balok yang akan di tempel CFRP dibuat berbentuk seperempat lingkaran dengan menggunakan grenda. Hal ini dimaksudkan agar meminimalisir adanya sobekan CFRP pada siku balok yang tajam.

Persiapan CFRP

CFRP dipotong- potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada kajian ini ukuran CFRP dari PT. Sika Nusa Pratama memiliki panjang 550 mm dan lebar 100 mm. Pemasangan CFRP sepanjang 600 mm (2,4h) dari bentang akan tetapi dikarenakan panjang

CFRP 550 mm akan mengalami pengurangan sebesar 50 mm dilakukan penambahan sebesar 100 mm agar pemasangan CFRP sesuai dengan perencanaan. Dan diberikan pemasangan CFRP pada balok 3D16 CFRP dan 4D16 CFRP sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) untuk mengantisipasi pembentukan sendi plastis.

Pengeleman CFRP Pada Balok

Perekat yang digunakan pada kajian ini menggunakan Sikadur®-330 produk dari PT. Sika Indonesia. Persiapan perekat dilakukan dengan mencampur campuran A dan Campuran B dengan perbandingan 4 : 1. Perekat disiapkan pada posisi CFRP dengan menggunakan kuas, dan CFRP ditempel pada posisi perekat dan di tekan tekan hingga perekat terlihat disamping sisi-sisi CFRP. Setelah itu, kuas kembali sisi CFRP dengan menggunakan perekat hingga CFRP tertutup rapat oleh perekat. Adapun proses pengeringan CFRP ini, kekuatan ultimit perekat hingga hari ke-7 sehingga pengujian balok dilakukan setelah hari ke-7 pemasangan CFRP pada balok.

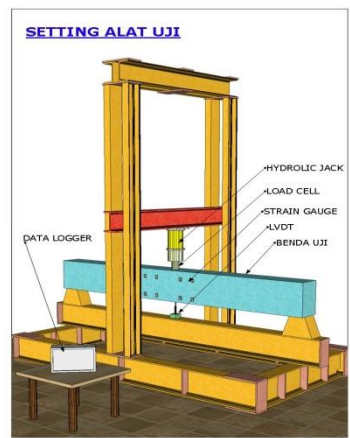
Set Up Pengujian

Benda uji balok beton bertulang ditempatkan pada *Loading Frame* dan tumpuan dikondisikan sendi-roll pada kedua ujungnya. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan beban secara monotonik yang bersifat statik dengan interval kenaikan sebesar 200 kg . Bentang bersih balok 2000 mm dan pembebanan dilakukan secara simetris di satu titik dengan jarak 1000 mm antar titik pembebanan dan diharapkan terjadi lentur murni. Untuk mengetahui pola retak yang terjadi pada model balok beton bertulang. Permukaannya dilapisi cat putih dan diberi garis saling tegak lurus sejarak 50 mm. Untuk mengetahui defleksi yang terjadi maka pada balok uji dipasang tiga buah LVDT (*Linear Variable Displacement Transducers*).

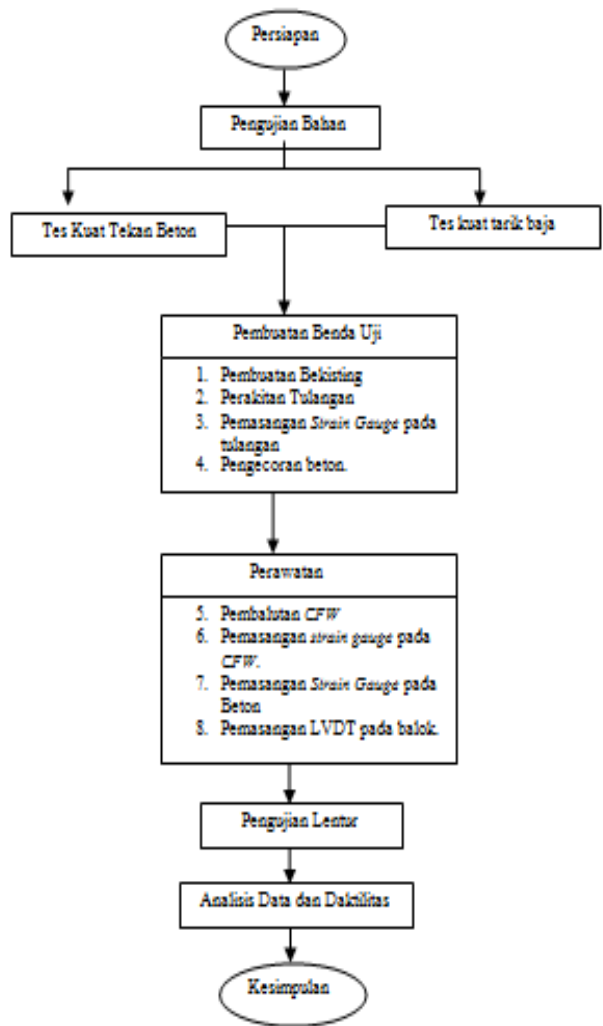
Dua buah ditemukan pada tumpuan dan satu buah di tengah bentang balok.

Penempatan LVDT pada kedua tumpuan digunakan untuk mengontrol apabila gelagar yang menumpu balok tidak cukup kaku (*melendut*) selama pembebanan berlangsung sedangkan penempatan LVDT di tengah bentang digunakan untuk mengetahui besar lendutan maksimum kapasitas 50 ton dan *load cell* yang mempunyai kapasitas sebesar 60 ton. Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan *interval* kenaikan sebesar 200 kg. Pembebanan akan dihentikan jika benda uji sudah runtuh dan *data logger* yang membaca besarnya beban dari *load cell* tidak bertambah. Setting up alat dan pembebanan dari model balok beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 11. *Setting Up* Pengujian balok lentur, sedangkan alur dalam kajian dapat dilihat pada Gambar 13. Data yang dicatat dalam meliputi:

- a. Besarnya retak awal akibat pembebanan (*first crack*).
- b. Beban pada saat terjadi *first crack* yang ditunjukkan di layar *data logger*.
- c. Defleksi selama pembebanan berlangsung yang ditunjukkan oleh LVDT. Defleksi di ukur di tiga titik yaitu satu titik ditengah bentang dan dua titik di bawah titik tumpuan. Defleksi yang dipakai untuk analisis adalah defleksi di tengah bentang karena dapat menunjukkan defleksi yang maksimum.
- d. Pola retak dan arah rambatan selama pembebanan berlangsung. Pengamatan ini dapat menggambarkan pola keruntuhan yang terjadi.
- e. Besarnya beban pada saat runtuh yang di tunjukkan oleh *data logger*.
- f. Besarnya regangan pada beton, baja dan pada *CFRP* yang ditunjukkan oleh *data logger*.



Gambar 12. *Setting Up* Pengujian balok lentur.



Gambar 13. Skema Tahapan Kajian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Kuat Tarik Baja

Dari hasil tegangan leleh dan ultimit masing masing tulangan memiliki hasil yang berbeda-beda, karena hasil produksi dari pabrik baja bahwa setiap tulangan memiliki kuat tarik belum tentu sama meskipun memiliki diameter yang sama. Tetapi perbedaan anatara kekuatan tulangan tidak terlalu besar dan masih bisa diterima. Tetapi perbedaan antara kekuatan tulangan tidak terlalu besar dan masih bisa diterima.

Dengan melihat hasil pengujian didapatkan tegangan leleh rata rata ϕ 6 mm $f_y= 339,9995$ MPa, tegangan ultimit rata-rata $f_u= 505,5523$ MPa. Untuk Tulangan ϕ 8 mm $f_y= 383,62915$ MPa, tegangan ultimit rata-rata $f_u= 534,8280$ MPa. Untuk tulangan D16 mm $f_y= 409,34383$ MPa, tegangan ultimit rata –rata $f_u = 593,9870$ MPa. Modulus elastisitas (E_s) baja tulangan = 200.000 MPa. Hasil pengujian dari kuat tarik baja tulangan ini adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Hasil pengujian baja tulangan ϕ 6, ϕ 8 dan D16.

No.	Diameter (mm)	F_y (MPa)	Rata-rata F_y (MPa)	F_u (MPa)	Rata-rata F_u (MPa)
1.	ϕ 6-1	360,0451	339,9995	504,0631	505,5523
2.	ϕ 6-2	317,2900		498,5986	
3.	ϕ 6-3	342,6635		513,9952	
4.	ϕ 8-1	372,0203	383,6292	534,7792	534,8280
5.	ϕ 8-2	388,8834		542,0799	
6.	ϕ 8-3	389,9837		527,6251	
7.	D16-1	434,0435	409,3438	641,6295	593,9870
8.	D16-2	373,3621		506,2537	
9.	D16-3	420,6259		634,0778	

Pengujian Kuat Tekan Silinder

Untuk memperoleh data kuat tekan beton yang digunakan beberapa sampel silinder beton untuk dilakukan pengujian kuat tekan beton. Pengujian kuat tekan silinder beton dilakukan pada umur 35 hari dan saat balok beton bertulang dilakukan pengujian geser. Pengujian kuat tekan silinder beton menggunakan *Compression Test Machine*. Dari hasil pengujian kuat tekan silinder beton dilakukan konversi umur 28 hari. Hasil pengujian kuat tekan silinder beton konversi 28 hari menunjukkan nilai tekan beton rata-rata f_c' sebesar 43,28 MPa. Berdasarkan pengujian kuat tekan silinder beton ini dapat dilihat beton mengalami perbedaan terhadap kuat tekan beton yang direncanakan sebesar

30 MPa. Sedangkan untuk silinder yang menggunakan *CFRP* memiliki nilai tekan f_c' sebesar 48,43 MPa

Pengujian Balok Beton Bertulang

Hasil analisis data dapat disimpulkan bahwa dengan perkuatan *CFRP* ini, balok masih dapat menerima beban sebesar beban perkuatan *CFRP*. Balok beton 3D16 Normal memiliki kapasitas lentur sebesar 104,04 kN sedangkan 3D16 dengan perlakuan *CFRP* memiliki kapasitas lentur 119,52 kN. Balok beton 4D16 Normal memiliki kapasitas lentur sebesar 161,28 kN sedangkan 4D16 dengan perlakuan *CFRP* memiliki kapasitas lentur 162,64 kN sedangkan 5D16 untuk perlakuan *CFRP* memiliki kapasitas lentur 173,16 kN.



Gambar 14. Grafik beban maksimum yang dapat diterima balok beton bertulang.

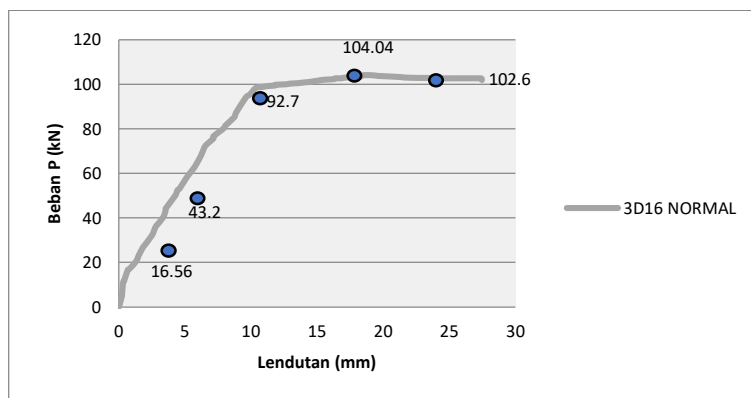
Balok beton bertulang tanpa menggunakan CFRP (3D16 Normal)

Berdasarkan pengujian balok 3D16 Normal menghasilkan keruntuhan yang sesuai dengan keruntuhan rencana. Pengujian pada balok normal diperoleh nilai P

maksimum adalah sebesar 104,04 kN dan balok beton 3D16 Normal mengalami *first crack* sebesar 16,56 kN. Berdasarkan grafik hubungan beban-lendutan dapat dilihat pada Gambar 16. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 3D16 Normal (tanpa CFRP).



Gambar 15. Retak awal pada balok 3D16 Normal



Gambar 16. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 3D16 Normal (tanpa CFRP).

Pada P sebesar 16,56 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0003 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0002. Sedangkan pada P sebesar 43,2 kN memiliki nilai ϵ_c 0,00156 dan nilai ϵ_s sebesar 0,00092. Sedangkan nilai P sebesar 92,7 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,00346 dan nilai ϵ_s sebesar 0,00212. Sedangkan nilai P sebesar 104,04 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0052 karena beton sudah runtuh (menurun) dan nilai ϵ_s sebesar 0,0039. Dan pada saat beban P sebesar 102,6 kN memiliki nilai ϵ_s 0,0037 tulangan besi sudah leleh dan beton sudah runtuh dengan nilai ϵ_c sebesar 0,0051.

Pada P sebesar 16,56 kN mencapai lendutan sebesar 0,68 mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 43,2 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 3,54 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 3D16 Normal maka

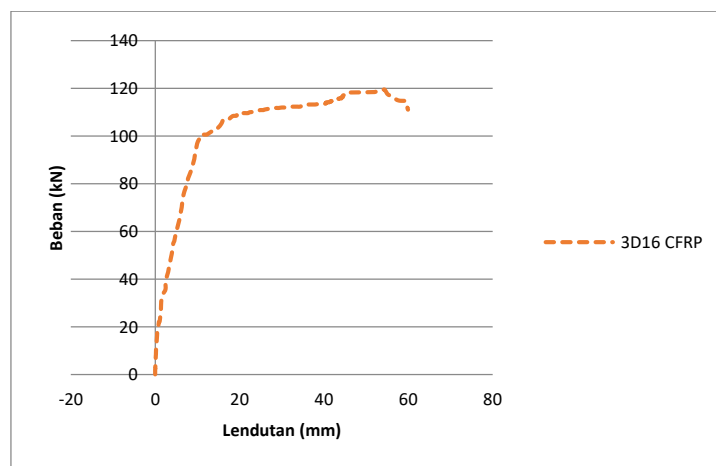
diperlukan penambahan P sebesar 92,7 kN mencapai lendutan sebesar 9,46 mm. Pada saat P sebesar 104,04 kN sudah mengalami keruntuhan pada balok 3D16 Normal dengan lendutan sebesar 18,56 mm. Sehingga dapat dihitung daktilitas perpindahan dengan lendutan sebesar $\delta_y = 2,76$ mm. Sedangkan nilai $\delta_u = 38,08$ mm sehingga diperoleh nilai daktilitas balok 3D16 Normal sebesar 13,7971.

Balok beton bertulang dengan menggunakan CFRP (3D16 CFRP).

Retak Pertama yang terjadi pada balok beton bertulang perkuatan CFRP dapat dilihat pada Gambar 17. Retak pertama yang terjadi pada balok 3D16 CFRP terjadi saat beban menunjukkan angka sebesar 8,1 kN.



Gambar 17. Retak pertama yang terjadi pada balok 3D16 CFRP



Gambar 18. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 3D16 CFRP

Pada P sebesar 8,1 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0001 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0001. Sedangkan pada P sebesar 49,5 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0017 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0010. Sedangkan nilai P sebesar 100,62 kN

memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0215 dan untuk nilai ϵ_s 0,0171. Sedangkan pada P sebesar 118,26 memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0365 karena beton sudah runtuh dan nilai ϵ_s sebesar 0,0290. Sedangkan nilai P sebesar

111,6 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,03211 karena beton sudah runtuh (menurun) dan nilai ϵ_s sebesar 0,0242.

Pada P sebesar 8,1 kN mencapai lendutan sebesar 0,16 mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 49,5 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 3,8 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 3D16 CFRP maka diperlukan penambahan P sebesar 100,62 kN mencapai lendutan sebesar 11,42 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 3D16 CFRP maka diperlukan penambahan P sebesar 118,26 kN mencapai lendutan sebesar 46,04 mm. Pada

saat P sebesar 111,6 kN sudah mengalami keruntuhan pada balok 3D16 CFRP dengan lendutan sebesar 59,84 mm. Sehingga dapat dihitung daktilitasnya dengan lendutan sebesar $\delta_y = 2,92$ mm. Sedangkan nilai $\delta_u = 59,96$ mm sehingga diperoleh nilai daktilitas perpindahan balok 3D16 CFRP sebesar 20,5343.

Balok beton bertulang tanpa menggunakan CFRP (4D16 Normal).

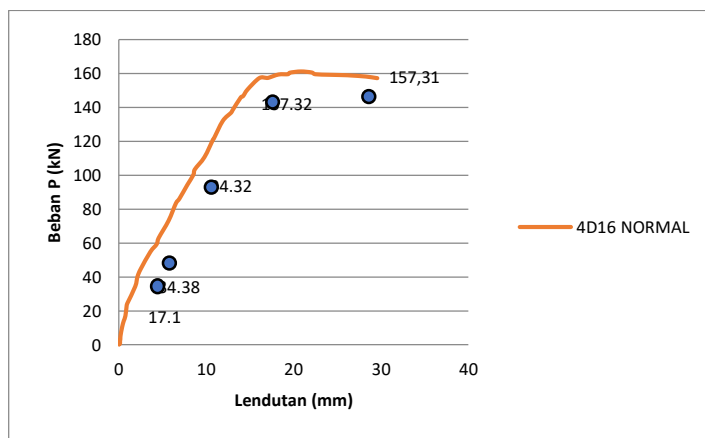
Lendutan dan retak pertama yang terjadi pada balok tanpa menggunakan perkuatan CFRP dapat dilihat melalui Gambar 15. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 Normal (tanpa CFRP).



Gambar 19. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 Normal (tanpa CFRP)

Retak Pertama yang terjadi pada balok beton bertulang Normal dapat dilihat pada Gambar 19. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 Normal terjadi saat beban menunjukkan angka sebesar 17,1 kN. Hubungan antara beban dengan lendutan pada balok beton untuk Balok 4D16 Normal ditunjukkan pada Gambar 16. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 Normal menghasilkan P maksimum adalah

sebesar 161,28 kN. Balok 4D16 Normal mengalami keruntuhan pada balok sampai pecah karena adanya perencanaan awal dengan nilai ρ mendekati *over reinforced* dengan nilai ρ sebesar 0,0235 sedangkan untuk nilai ρ maks sebesar 0,0236 maka balok mengalami pecah pada pengujian balok 4D16 Normal. Berdasarkan grafik hubungan beban-lendutan dapat dilihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 4D16 Normal (Tanpa CFRP)

Pada P sebesar 17,1 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,00039 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0002. Sedangkan pada P sebesar 34,38 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0009 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0004. Sedangkan nilai P sebesar 94,32 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0030 karena beton sudah runtuh dan nilai ϵ_s sebesar 0,0015. Sedangkan nilai P sebesar 157,32 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0162 karena beton sudah runtuh dan nilai ϵ_s sebesar 0,01047. Pada P sebesar 17,1 kN mencapai lendutan sebesar 0,76 mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 34,38 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 1,88 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 4D16 Normal maka diperlukan penambahan P sebesar 94,32 kN mencapai lendutan sebesar 7,84 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 4D16 Normal maka diperlukan penambahan P sebesar 157,32 kN mencapai lendutan sebesar 16,06 mm. Pada saat P sebesar 157,31 kN sudah mengalami keruntuhan

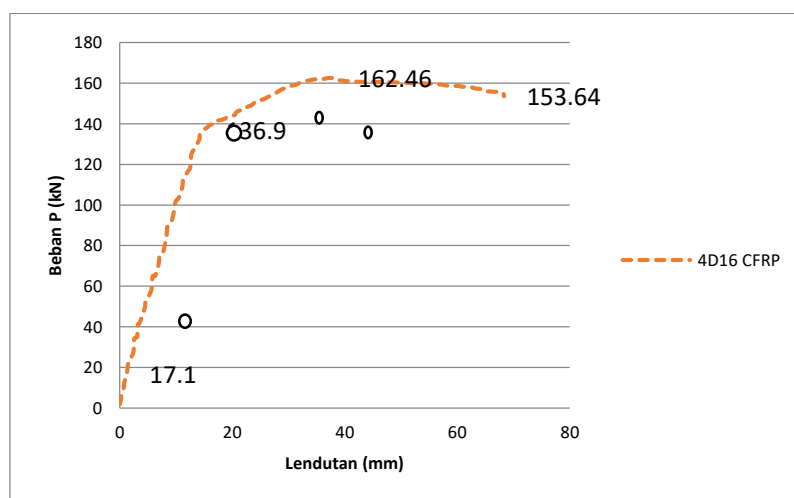
pada balok 4D16 Normal dengan lendutan sebesar 29,58 mm. Sehingga dapat dihitung daktilitasnya dengan lendutan sebesar $\delta_y = 3,62$ mm. Sedangkan nilai $\delta_u = 29,58$ mm sehingga diperoleh nilai daktilitas perpindahan balok 4D16 Normal sebesar 8,1713.

Balok beton bertulang menggunakan perlakuan CFRP (4D16 CFRP).

Retak Pertama yang terjadi pada balok beton bertulang perkuatan CFRP dapat dilihat pada Gambar 21. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 CFRP terjadi saat beban menunjukkan angka sebesar 17,1 kN. Hubungan antara beban dengan lendutan pada balok beton dengan perkuatan CFRP untuk Balok 4D16 CFRP ditunjukkan pada Gambar. 18. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 dengan perlakuan CFRP menghasilkan P maksimum adalah sebesar 162,64 kN.



Gambar 21. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 CFRP.



Gambar 22. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 dengan perlakuan CFRP

Berdasarkan pengujian Balok CFRP 4D16 menghasilkan keruntuhan yang sesuai dengan keruntuhan rencana. Pengujian pada balok dengan perlakuan CFRP diperoleh nilai P maksimum adalah sebesar 162,64 kN dengan nilai *first crack* 17,1 kN. Pada P sebesar 17,1 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0005 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0002. Sedangkan pada P sebesar 136,9 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0053 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0026. Sedangkan nilai P sebesar 162,64 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0130 karena beton sudah runtuh dan nilai ϵ_s sebesar 0,0088. Sedangkan nilai P sebesar 153,64 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0118 karena beton sudah runtuh (menurun) dan nilai ϵ_s sebesar 0,0078.

Pada P sebesar 17,1 kN mencapai lendutan sebesar 1,28 mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 136,9 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 14,86 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 4D16 CFRP maka diperlukan

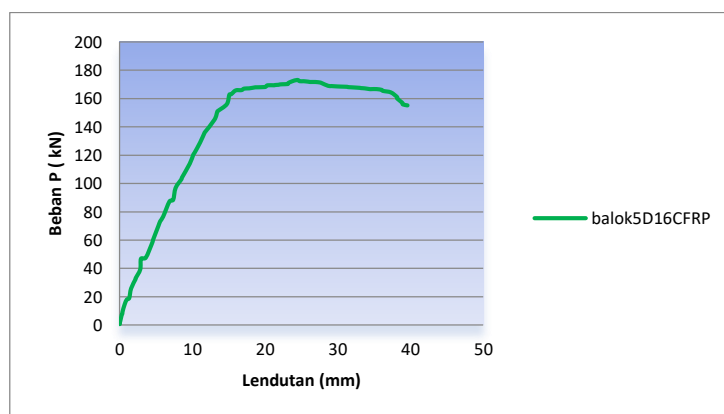
penambahan P sebesar 162,64 kN mencapai lendutan sebesar 37,1 mm. Pada saat P sebesar 153,64 kN sudah mengalami keruntuhan pada balok 4D16 CFRP dengan lendutan sebesar 68,3 mm. Sehingga dapat dihitung daktilitas perpindahan diperoleh sebesar $\delta_y = 4,62$ mm. Sedangkan nilai $\delta_u = 68,3$ mm sehingga diperoleh nilai daktilitas balok 4D16 CFRP sebesar 14,7749.

Balok beton bertulang menggunakan perlakuan CFRP (5D16 CFRP).

Retak pertama yang terjadi pada balok beton bertulang perkuatan CFRP dapat dilihat pada gambar 24. Retak pertama yang terjadi pada balok 5D16 CFRP terjadi saat beban menunjukkan angka sebesar 47,52 kN. Hubungan antara bebandengan lendutan pada balok beton dengan perkuatan CFRP untuk Balok 5D16 CFRP ditunjukam pada Gambar 24. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 5D16 dengan perlakuan CFRP menghasilkan P maksimum adalah sebesar 173,16 kN.



Gambar 23. Retak pertama yang terjadi pada balok 5D16 CFRP



Gambar 24. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 5D16 dengan perlakuan CFRP

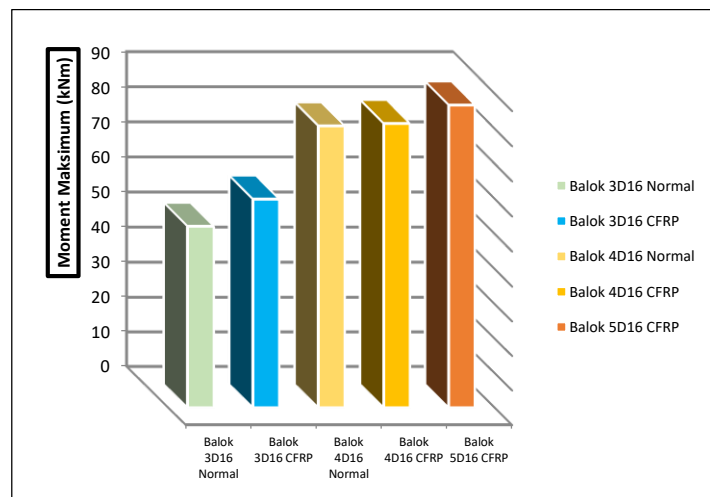
Berdasarkan pengujian Balok CFRP 5D16 menghasilkan keruntuhan yang sesuai dengan keruntuhan rencana. Pengujian pada balok dengan perlakuan CFRP diperoleh nilai P maksimum adalah sebesar 173,16 kN dengan nilai *first crack* 47,52 kN. Pada P sebesar 47,52 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0003 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0006. Sedangkan pada P sebesar 135,9 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0009 dan nilai ϵ_s sebesar 0,00204. Sedangkan nilai P sebesar 173,16 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,00122 karena beton sudah runtuh dan nilai ϵ_s sebesar 0,0077. Sedangkan nilai P sebesar 155,16 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0015 karena beton sudah runtuh (menurun) dan nilai ϵ_s sebesar 0,006.

Pada P sebesar 32,4 kN mencapai lendutan sebesar 2,2mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 135,9 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 11,68 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 5D16 CFRP maka diperlukan penambahan P sebesar 173,16 kN mencapai lendutan sebesar 24,42 mm. Pada saat P sebesar 155,16 kN sudah

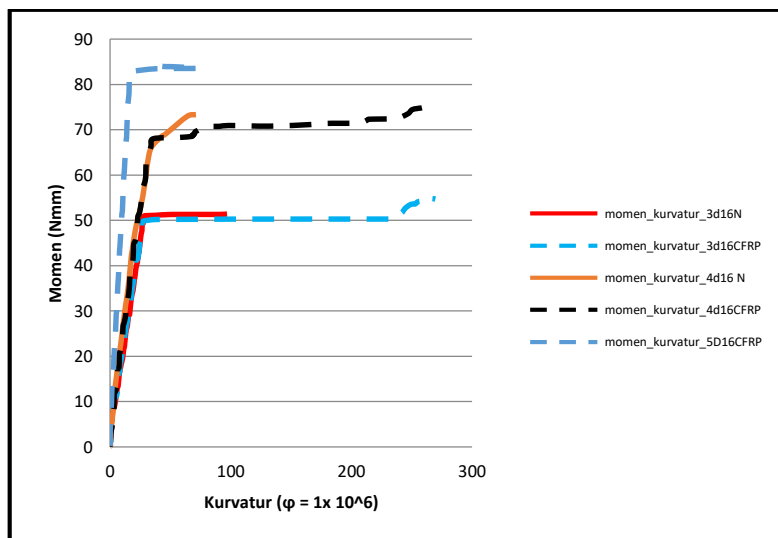
mengalami keruntuhan pada balok 5D16 CFRP dengan lendutan sebesar 39,56 mm. Sehingga dapat dihitung daktilitas perpindahan diperoleh sebesar $\delta_y = 2,2$ mm. Sedangkan nilai $\delta_u = 41,16$ mm sehingga diperoleh nilai daktilitas balok 5D16 CFRP sebesar 18,71.

Hubungan Momen Dan Kurvatur

Hasil hubungan momen dan kurvatur dapat disimpulkan bahwa dengan perkuatan CFRP ini balok masih dapat menerima beban sebesar beban perkuatan CFRP. Balok beton 3D16 Normal memiliki momen nominal sebesar 52,02 kNm sedangkan 3D16 dengan perlakuan CFRP memiliki momen maksimum 59,76 kNm. Balok beton 4D16 Normal memiliki kapasitas lentur sebesar 80,64 kNm sedangkan 4D16 dengan perlakuan CFRP memiliki kapasitas lentur 81,32 kNm. Sedangkan 5D16 dengan perlakuan CFRP memiliki kapasitas lentur sebesar 86,58 kNm. Penambahan CFRP sangat mempengaruhi dalam pengujian balok beton bertulang sangat mempengaruhi peningkatan kapasitas momen maksimum pada balok beton bertulang



Gambar 25. Grafik momen maksimum yang dapat diterima balok beton bertulang.



Gambar 26. Hubungan antara momen dan kurvatur pada balok 3D16 Normal, balok 3D16 CFRP, balok 4D16 Normal dan balok 4D16 CFRP serta balok 5D16 CFRP.

Hasil perbandingan antara beban- lendutan pada Balok Normal dengan Balok Perkuatan CFRP. Dari Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan penambahan CFRP mengalami peningkatan. Pada balok 3D16 Normal yang memiliki nilai momen nominal maksimumnya sebesar 52,02 kNm setelah dilakukan pemotongan pada grafik hubungan antara momen dan kurvatur pada balok 3D16 Normal memiliki nilai momen nominal sebesar 51,39 kNm. Dan penambahan perkuatan CFRP menghasilkan momen nominal maksimum pada balok 3D16 CFRP sebesar 59,76 kNm setelah dilakukan pemotongan pada grafik hubungan antara momen dan kurvatur pada balok 3D16 CFRP memiliki nilai momen

nominal sebesar 54,81 kNm. Pada balok 4D16 Normal yang memiliki nilai momen nominal maksimumnya sebesar 80,64 kNm setelah dilakukan pemotongan pada grafik hubungan antara momen dan kurvatur pada balok 4D16 Normal memiliki nilai momen nominal sebesar 75,33 kNm. Sedangkan untuk balok 4D16 CFRP momen nominal maksimum yang tercapai 81,32 kNm setelah dilakukan pemotongan pada grafik hubungan antara momen dan kurvatur pada balok 4D16 CFRP memiliki nilai momen nominal sebesar 76,57 kNm, sedangkan untuk balok 5D16 CFRP memiliki momen nominal sebesar 86,58 kNm. Penggunaan CFRP sangat mempengaruhi dalam pengujian balok beton bertulang.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas lentur pada balok 3D16 Normal sebesar 51,39 kNm dan balok 3D16 CFRP sebesar 54,81 kNm. Sehingga dengan pembalutan CFRP sangat mempengaruhi peningkatan kapasitas lentur sebesar 13%. Kapasitas lentur pada balok 4D16 Normal sebesar 75,33 kNm dan balok 4D16 CFRP sebesar 76,57 kNm sedangkan untuk balok 5D16 CFRP sebesar 86,58 kNm.
2. Daktilitas perpindahan pada balok 3D16 Normal sebesar 13,7971 dan balok 3D16

- CFRP sebesar 20,5343. Daktilitas perpindahan pada balok 4D16 Normal sebesar 8,1713 dan balok 4D16 CFRP sebesar 14,7836 sedangkan untuk balok 5D16 CFRP sebesar 18,71. Sehingga dengan pembalutan CFRP sangat mempengaruhi peningkatan daktilitas.
3. Kondisi kegagalan CFRP pada balok normal dan perkuatan CFRP adalah rusaknya CFRP (sobek), dimana kerusakan CFRP lebih dominan pada mengelupasnya CFRP dari balok.

Berdasarkan pengujian, pemakaian CFRP dapat meningkatkan kuat geser dibandingkan dengan balok normal. Dalam hasil analisis perhitungan perencanaan balok normal tanpa perlakuan CFRP memiliki kuat geser sebesar 158,5974 kN dan balok yang diberikan perlakuan CFRP memiliki kuat geser sebesar 205,9511 kN. Hasil ini

membuktikan bahwa dengan benda uji dan pemasangan CFRP sesuai pada kajian diperoleh hasil yang sesuai dengan standar ACI 440, sehingga masih aman dan dapat digunakan referensi dalam rangka perkuatan balok dengan kondisi pada saat momen positif maupun momen negatif sebagai perilaku balok saat terjadi gempa.

DAFTAR RUJUKAN

- ACI 440.2R-08. (2008). "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI Commite 440.
- Nawy, Edward G. (1995). *Reinforced A fundamental Approach*. Department of Civil and Enviromental Engeenering. Rutgers University. The State University of New Jearsey. New Jearsey
- Pangestuti Endah Kanti. (2006). "Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate Sebagai Tulangan Eksternal pada Struktur Balok Beton." Universitas Negeri Semarang.
- Paulay, T., and Priestley, M.J.N. (1992). "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Paulay, T., and Priestley, M.J.N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, JohnWiley & Sons, Inc., New York.
- Prihadi, W. R., & Pratama, G. N. I. P. (2016). Konfigurasi Batang Pada Perancangan Rangka Atap Bambu. *INformasi dan Ekspose hasil Riset Teknik Slpil dan Arsitektur*, 12(2), 173-183.
- Prihanantio Januar, Pangestuti Endah Kanti. (2006). "Analisis Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan Carbon Fiber Wrap." Universitas Diponegoro Semarang.
- Santoso H M. (2000) *Sika Strengthening System*, PT. Sika Nusa Pratama, Semarang.
- SNI – 03 – 2847 – S2013. (2013). "Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung"
- Umbu Nday Albert Aun. (2012). "Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Perkuatan Carbon Fiber Wraps (CFRP) (Balok Dibebani Oleh Beberapa Kondisi Pembebanan Awal Dan Kemudian Diperkuat Dengan CFRP)". Universitas Gadjah Mada.
- Sri Rejeki Laku Utami. (2016). "Pengaruh Pembalutan Carbon Fiber Wrap (CFW) Terhadap Daktilitas Balok Beton Bertulang". Universitas Diponegoro.