

PENGARUH PEMBALUTAN CARBON FIBER WRAP (CFW) TERHADAP DAKTILITAS BALOK BETON BERTULANG

Sri Rejeki Laku Utami¹, Nuroji², Antonius³

^{1,2,3}MTS UNDIP

Email: udhitami@gmail.com

ABSTRACT

Wrapping Carbon Fiber Wrap on reinforced concrete beams are expected to contribute to the improvement of ductility. In this study four beam specimens. The first test object beam 3D16 Normal used as a normal beam. The test object into two beams 3D16 CFW is used as a treatment beam with the dressing CFW. The test object to the three beams 4D16 Normal is used as a normal beam. The test object into four beams 4D16 CFW is used as a treatment beam with the dressing CFW. Dimensional beam - the beam is 150 x 250 mm, the effective length 2000 mm. Imposition given One Point Loads, to test the loading on beam flexural planned to put the pieces of force P symmetrically at a distance that is equal to $\frac{1}{2} L$ 1000 mm. And given a dressing CFW on the beam 3D16 CFW along the 600 mm (2.4 h) the middle span length of 2000 mm with treatment CFW Completely Wrapped Member. From the test results maximum bending capacity respectively for beams 3D16 Normal of 104.04 kN while on the beams 3D16 CFW increased maximum bending capacity of 119.52 kN, increase in ductility displacement on the beam by 33%. On the beam 4D16 Normal has a maximum bending capacity of 161.28 kN the beam 4D16 CFW increased maximum bending capacity of 162.64 kN, increase in ductility displacement on the beam by 45%. The maximum nominal value at the moment of reinforced concrete beam greatly affect the capacity maximum moment on the beam 3D16 Normal with beams 3D16 CFW after dressing CFW on the beams increased by 13% while on the beam 4D16 Normal with beams 4D16 CFW increased by 1%. Ductility curvature on beam 3D16 Normal with beams 3D16 CFW increased by 63% whereas for beams 4D16 Normal with beams 4D16 CFW curvature ductility increased by 67%.

Keyword: CFW (Carbon Fiber Wraps), ductility, flexural strength, moment-curvature.

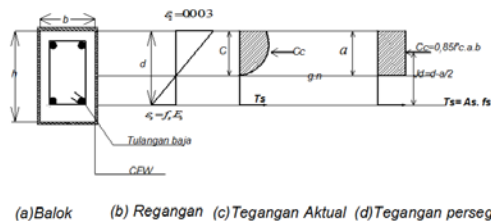
ABSTRAK

Pembalutan *Carbon Fiber Wrap* pada balok beton bertulang diharapkan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daktilitas. Pada penelitian ini empat buah benda uji balok. Benda uji pertama adalah balok 3D16 Normal yang digunakan sebagai balok normal. Benda uji ke dua adalah balok 3D16 CFW yang digunakan sebagai balok dengan perlakuan pembalutan CFW. Benda uji ke tiga adalah balok 4D16 Normal yang digunakan sebagai balok normal. Benda uji ke empat adalah balok 4D16 CFW yang digunakan sebagai balok dengan perlakuan pembalutan CFW. 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 pembalutan CFW pada balok 3D16 CFW sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjangnya 2.000 mm dengan perlakuan CFW *Completely Wrapped Member*. Dari hasil pengujian kapasitas lentur maksimum secara berturut- turut untuk balok 3D16 Normal sebesar 104,04 kN sedangkan pada balok 3D16 CFW mengalami peningkatan kapasitas lentur maksimum sebesar 119,52 kN, peningkatan daktilitas perpindahan pada balok sebesar 33%. Pada balok 4D16 Normal memiliki kapasitas lentur maksimum sebesar 161,28 kN sedangkan balok 4D16 CFW mengalami peningkatan kapasitas lentur maksimum sebesar 162,64 kN, peningkatan daktilitas perpindahan pada balok sebesar 45%. Nilai momen nominal maksimum pada balok beton bertulang sangat mempengaruhi peningkatan kapasitas momen maksimum pada balok 3D16 Normal dengan balok 3D16 CFW setelah dilakukan pembalutan CFW pada balok mengalami peningkatan sebesar 13% sedangkan pada balok 4D16 Normal dengan balok 4D16 CFW mengalami peningkatan sebesar 1%. Nilai daktilitas kurvatur pada balok 3D16 Normal dengan balok 3D16 CFW mengalami peningkatan sebesar 63% sedangkan untuk balok 4D16 Normal dengan balok 4D16 CFW mengalami peningkatan daktilitas kurvatur sebesar 67%.

Kata kunci: *CFW (Carbon Fiber Wraps)*, daktilitas, kuat lentur, momen-kurvatur.

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 daktil, yaitu adanya peristiwa kelelahan sebelum bahan runtuh akibat pembebanan yang diberikan. Pemberian perkuatan pada elemen balok beton bertulang, berupa pembalutan CFW merupakan salah satu usaha untuk meningkatkan kekuatan, kekakuan dan daktilitas beton bertulang. Pembalutan CFW 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 $Jd_2 > Jd_1$ sehingga $M_2 > M_1$ seperti terlihat pada Gambar 1. Pengaruh penempatan tulangan baja terhadap jarak jd pada diagram tegangan.

CFW adalah salah satu bahan komposit non-logam dari serat karbon yang biasa digunakan sebagai bahan perkuatan geser, dan menggantikan baja tulangan yang hilang. CFW dalam 1 roll memiliki panjang 100 m dan lebar kain CFW sebesar 500 mm. Selain mempunyai kuat tarik yang tinggi yaitu 4.800 N/mm² dengan modulus elastisitasnya 234.000 N/mm². Regangan pada regangan > 1.8 % , *Fibre desinty* 1,76 g/cm³. Ketebalan kain (*Fabric Design Thickness*) 0,131 mm dan *Area Weight* 230 g/m². Apalagi pemakaian CFW dapat disesuaikan ukurannya karena berbentuk lembaran kain. CFW mempunyai kuat tarik yang sangat tinggi.

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 pelelehan pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan 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 tekan dengan adanya penambahan CFW agar beton terkekang (*external confinement*).

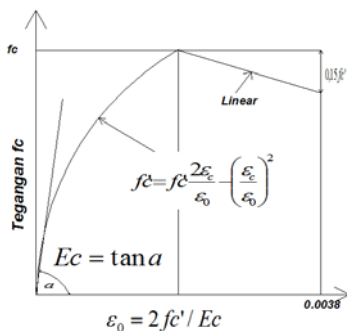
Pembalutan CFW pada balok beton bertulang diharapkan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daktilitas. Dengan menggunakan model konstitutif (kurva hubungan tegangan – regangan) beton terkekang, dibuat program analisis untuk mengetahui sejauh mana pengaruh pembalutan CFW terhadap daktilitas balok beton bertulang dan kapasitas penampang balok beton bertulang. Dari latar belakang permasalahan di atas maka perlu dilakukan penelitian tentang “Pengaruh Pembalutan CFW Terhadap Daktilitas Balok Beton Bertulang”. Manfaat yang ingin diperoleh dari penelitian ini antara lain bertambahnya wawasan dan pengetahuan dan memahami permasalahan teknologi beton. Khususnya mengenai pengaruh balok beton bertulang oleh CFW terhadap daktilitas balok beton bertulang. Sebagai masukan standar / Code SNI dan daktilitas dapat diprediksi setelah adanya pembalutan CFW pada balok bertulang.

Agar penelitian dan 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.

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 2.1. 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).

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

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

$$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_o} \leq 1$$

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

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

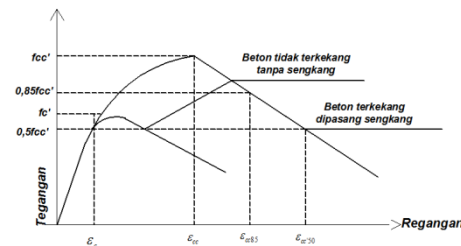
$$E_c = 3320 \sqrt{f_c'} + 6900 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_{co} = \frac{f_c' \cdot n}{E_c \cdot n - 1}$$

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

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.



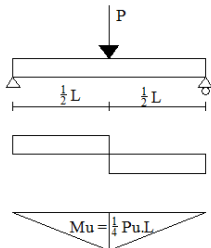
Gambar 3. Grafik tegangan- regangan beton terkekang dan beton tidak terkekang.

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.

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 (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 $0,5 f_c'$. kemiringan garis lurus bagian awal kurva

(pada daerah elastis) didefinisikan sebagai modulus elastisitas E_c . Untuk kurva hubungan tegangan –regangan *Hognestad*.

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



Gambar 4. Pola Pembebanan

$$C_c = T_s \Rightarrow C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot ab \cdot b \dots (1)$$

$$T_s = A_s \cdot f_s = A_s \cdot f_y \cdot c_b = 0,003 \cdot d / (0,003 + \epsilon_s)$$

bila $\epsilon_s = f_y / E_s$ dengan $E_s = 200.000 \text{ Mpa}$, maka $c_b = 600 d / (600 + f_y) \dots (2)$

$$ab = \beta_1 \cdot c_b ; \text{ bervariasi misalnya } \beta_1 = 0,85 \text{ untuk } f_c' \leq 30 \text{ MPa} \dots (3)$$

$$ab = \beta_1 \cdot 600 \cdot d / (600 + f_y) ; \text{ agar penulangan liat} \dots (4)$$

$$\text{maka digunakan } \Rightarrow a = 0,75 \cdot ab = \beta_1 \cdot 450 \cdot d / (600 + f_y), a \text{ merupakan fungsi dari } d (\beta_1 \text{ dan } f_y \text{ diketahui}) \dots (5)$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a \dots (6)$$

$$M_n = T_s (d - \frac{1}{2} \cdot a) = C_c (d - \frac{1}{2} \cdot a) = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot a (d - \frac{1}{2} \cdot a) \dots (7)$$

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 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.

$$\mu = \frac{\Delta u, \max}{\Delta y}$$

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

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

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

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



Gambar 5. Cara Pemakaian *Carbon Wrapping* jenis *Sika Hex 231 C*.

Penggunaan *CFW* sebagai tulangan eksternal pada struktur beton memerlukan bahan pengikat agar diperoleh aksi komposit antara beton dan *CFW*. 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 $1.30 \pm 0.1 \text{ kg/l (part A+B) (at } +23^{\circ}\text{C) (evacuated)}$ yang di oleskan pada permukaan beton.



Gambar 6. Epoxy adhesives jenis Sikadur®-330.

Prihanantio dan Pangestuti (2006) mengungkapkan bahwa untuk melakukan penelitian dengan CFW 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 CFW dengan variasi yang berbeda yaitu BCFW- $\frac{1}{2}$ b, BCFW-b, dan BCFW- 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 CFW selebar $\frac{1}{2}$ b (BCFW- $\frac{1}{2}$ b) pada bagian sisi tariknya menyebabkan kenaikan kapasitas momen sebesar 72,22 %, daktilitas naik sebesar 119,3 % terhadap balok kontrol dan efektifitas CFW sebesar 36 %. Perkuatan lentur dengan CFW selebar b (BCFW- b) pada bagian sisi tariknya menyebabkan kenaikan momen sebesar 91,71 %, daktilitas balok naik sebesar 233,33 % terhadap BK. Efektifitas CFW sebesar 48,67 %.

Perkuatan CFW model U (BCFW-U) dapat meningkatkan kapasitas momen sebesar 8,33 % daktilitas balok naik sebesar 7,72 % terhadap BK. Efektifitas CFW sebesar 1,33 %. Maka Perkuatan lentur menggunakan CFW dapat meningkatkan kapasitas lentur balok. Namun BCFW-b yang paling signifikan jika dibandingkan terhadap BK. Pada BCFW- U pemasangan CFW model tersebut sangat tidak efektif, karena seratnya searah dengan pola retak yang terjadi pada balok. Pada eksperimen ini CFW mengalami putus pada daerah geser baik pada BCFW- $\frac{1}{2}$ b maupun BCFW – b. Hal ini dikarenakan ketika beton runtuh CFW 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 CFW. (Prihanantio dan Pangestuti , 2006).

Albert Aun Uumbu Nday (2012) CFW pada balok beton bertulang yang sudah dan sedang dibebani oleh beban mati. Dalam penelitian ini digunakan 4 buah benda uji balok, terdiri dari : 1 balok kontrol (BK), dan 1 balok yang diperkuat dengan CFW tanpa beban awal (BP 0%), serta 2 balok yang diperkuat dengan CFW setelah balok dibebani 30% dan 60% beban ultimit (BP 30% dan BP 60 %). Balok memiliki lebar 150 mm, tinggi 200 mm dan panjang 2000 mm.

Balok sederhana dengan dua tumpuan dikedua ujungnya dibebani terpusat tepat di tengah bentang. Parametyer yang di ukur dalam pengujian ini adalah beban, lendutan, regangan baja, dan lebar retak yang terjadi. Dari hasil pengujian dapat disimpulkan terhadap BK yaitu balok BP 0 %, BP 30 %, dan BP 60 % mengalami peningkatan kekuatan secara berturut –turut sebesar 114,28% , 108,57 % dan 105, 71%. Kapasitas lentur hasil eksperimen dibandingkan dengan hasil teoritis secara berturut- turut pada BK, BP 0 %, BP 30 % dan BP 60 % yaitu 94,42 %, 102,78 %, 97,68 % dan 94,41 %. Kekauan kondisi retak pada bebann7 kN terhadap BK yaitu balok BP 0 %, BP 30 % dan BP 60% mengalami peningkatan kekauan secara berturut-turut sebesar 117,27%, 96,99 %, 90,20 %. Daktilitas terhadap BK yaitu balok BP 0 %, BP 30%, dan BP 60 % mengalami peningkatan daktilitas secara berturut turut sebesar 45, 90% , 63,97 %, 45,47%. Pola keruntuhan yang terjadi pada BK, BP 0%, 30 % dan BP 60 % adalah keruntuhan lentur. Perkuatan dengan CFW memiliki keuntungan dalam proses pelaksanaannya yaitu mudah dipasang dan menghemat waktu.

METODOLOGI

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 ($3\emptyset 16$) dan ($4\emptyset 16$) 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 *undereinforced*. Sedangkan material komposit *CFW* ditambahkan pada balok uji *eksternal*, *CFW* 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.

Untuk 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.

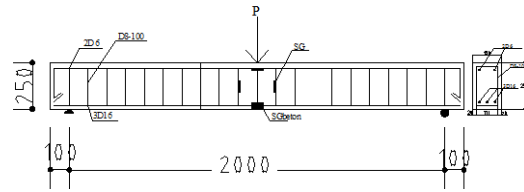
Dan diberikan pemasangan *CFW* pada balok 3D16 dengan perlakuan *CFW* dan balok 4D16 *CFW* sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) dengan pemasangan *CFW Completely Wrapped Member*. Benda uji berupa balok bertulang yaitu 8 silinder beton normal, 1 silinder beton yang diperkuat dengan *CFW*, 2 Balok Normal, 2 Balok yang diperkuat dengan *CFW*.

Tabel 2. Variabel Pengujian Benda Uji

No	Benda Uji	Perlakuan
1.	1 Balok Normal dengan Tulangan tarik 3D16	Tanpa <i>CFW</i>
2.	1 Balok dengan Tulangan tarik 3D16	Diperkuat dengan <i>CFW</i>
3.	1 Balok Normal dengan Tulangan tarik 4D16	Tanpa <i>CFW</i>
4.	1 Balok dengan Tulangan tarik 4D16	Diperkuat dengan <i>CFW</i>

- a. Balok Beton Normal 3D16 (Tanpa Perkuatan *CFW*).
Balok Beton Normal 3D16 (Tanpa Perkuatan *CFW*) ini menggunakan tulangan lentur 3D16 mm, tulangan sengkang $\varnothing 8$ mm – 100 mm, dan Tulangan Tekan $2\varnothing 6$ mm. Adapun untuk

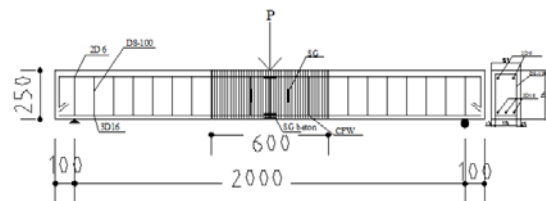
lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 7. Balok Beton 3D16 Normal.



Gambar 7. Balok Beton 3D16 Normal.

- b. Balok Beton 3D16 dengan Perlakuan *CFW*.

Balok Beton 3D16 dengan perlakuan *CFW* ini menggunakan tulangan lentur 3D16 mm, tulangan sengkang $\varnothing 8$ mm – 100 mm, dan Tulangan Tekan $2\varnothing 6$ mm. *CFW* dipotong- potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada penelitian ini ukuran *CFW* dari PT. Sika Nusa Pratama memiliki panjang 550 mm dan lebar 100 mm. Pemasangan *CFW* sepanjang 600 mm (2,4h) dari bentang akan tetapi dikarenakan panjang *CFW* 550 mm akan mengalami pengurangan sebesar 50 mm dilakukan penambahan sebesar 100 mm agar pemasangan *CFW* sesuai dengan perencanaan. Dan diberikan pemasangan *CFW* pada balok 3D16 *CFW* sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) dengan pemasangan *CFW Completely Wrapped Member*, untuk mengantisipasi pembentukan sendi plastis seperti pada Gambar 3.3. Balok Beton 3D16 dengan perlakuan *CFW*.

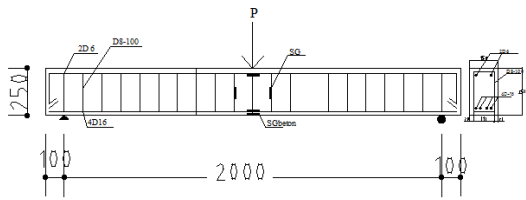


Gambar 8. Balok Beton 3D16 dengan perlakuan *CFW*.

- c. Balok Beton 4D16 Normal (Tanpa Perlakuan *CFW*).

Balok Beton 4D16 Normal (tanpa perlakuan *CFW*) 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

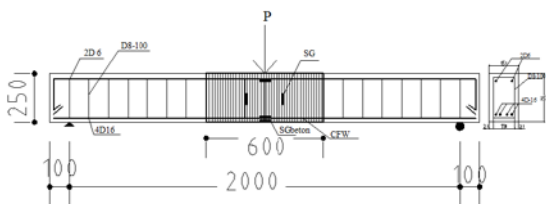
3.4. Balok Beton 4D16 Normal (tanpa perlakuan CFW).



Gambar 9. Balok Beton 4D16 Normal.

d. Balok Beton 4D16 dengan Perlakuan CFW.

Balok Beton 4D16 dengan perlakuan CFW ini menggunakan tulangan lentur 4D16 mm, tulangan sengkang Ø8 mm – 100 mm, dan Tulangan Tekan 2Ø6 mm. CFW dipotong-potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada penelitian ini ukuran CFW dari PT. Sika Nusa Pratama memiliki panjang 550 mm dan lebar 100 mm. Pemasangan CFW sepanjang 600 mm (2,4h) dari bentang akan tetapi dikarenakan panjang CFW 550 mm akan mengalami pengurangan sebesar 50 mm dilakukan penambahan sebesar 100 mm agar pemasangan CFW sesuai dengan perencanaan. Dan diberikan pemasangan CFW pada 4D16 CFW sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) dengan pemasangan CFW *Completely Wrapped Member*, untuk mengantisipasi pembentukan sendi plastis seperti pada Gambar 10. Balok Beton 4D16 dengan perlakuan CFW.



Gambar 10. Balok Beton 4D16 dengan Perlakuan CFW.

Pemasangan Strain Gauge

Untuk mengetahui besarnya regangan pada beton, tulangan maupun CFW dilakukan pemasangan *Strain gauge* pada bahan bahan tersebut di balok uji. Strain gauge yang dipakai dalam penelitian ini terdiri dari dua macam yaitu type PL-60-11 dengan Panjang 60 mm yang dipakai untuk mengukur regangan beton

dan type FLA -6 -11 dengan panjang 6 mm yang dipakai untuk mengukur regangan CFW, type ini juga bisa dipakai untuk mengukur regangan baja. Untuk mengetahui regangan beton, *strain gauge* dipasang pada permukaan beton bagian atas sisi tekan, sedang untuk CFW 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 CFW yang terdapat pada balok 3D16 CFW dan balok 4D16 CFW, 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 CFW adalah Balok beton bertulang sebagai balok perlakuan dengan pembalutan CFW yang terdapat pada balok beton CFW 3D16 CFW dan 4D16 CFW. Balok CFW ini akan dibandingkan dengan data – data dari balok uji yang tidak dipasang dengan CFW yang terdapat pada balok 3D16 Normal dan balok 4D16 Normal, sehingga dapat diketahui perbedaannya. Pada Balok CFW *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 CFW yang berfungsi untuk mendapatkan nilai regangan pada beton tarik yang dipasang dengan CFW. 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 dilanjut dengan penuangan beton kedalam 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 CFW Pada Benda Uji

Persiapan Balok

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

dimaksudkan agar meminimalisir adanya sobekan CFW pada siku balok yang tajam.

Persiapan CFW

CFW dipotong- potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada penelitian ini ukuran CFW dari PT. Sika Nusa Pratama memiliki panjang 550 mm dan lebar 100 mm. Pemasangan CFW sepanjang 600 mm (2,4h) dari bentang akan tetapi dikarenakan panjang CFW 550 mm akan mengalami pengurangan sebesar 50 mm dilakukan penambahan sebesar 100 mm agar pemasangan CFW sesuai dengan perencanaan. Dan diberikan pemasangan CFW pada balok 3D16 CFW dan 4D16 CFW sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah bentang yang panjang bentangnya 2.000 mm (2 meter) untuk mengantisipasi pembentukan sendi plastis.

Pengeleman CFW Pada Balok

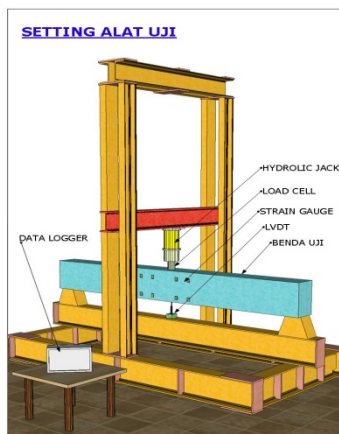
Perekat yang digunakan pada penelitian ini menggunakan *Sikadur*®-330 produk dari PT. Sika Indonesia. Persiapan perekat dilakukan dengan mencampur campuran A dan Campuran B dengan perbandingan 4 : 1. Perekat disiapkan pada posisi CFW dengan menggunakan kuas, dan CFW ditempel pada posisi perekat dan di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

Set Up Pengujian

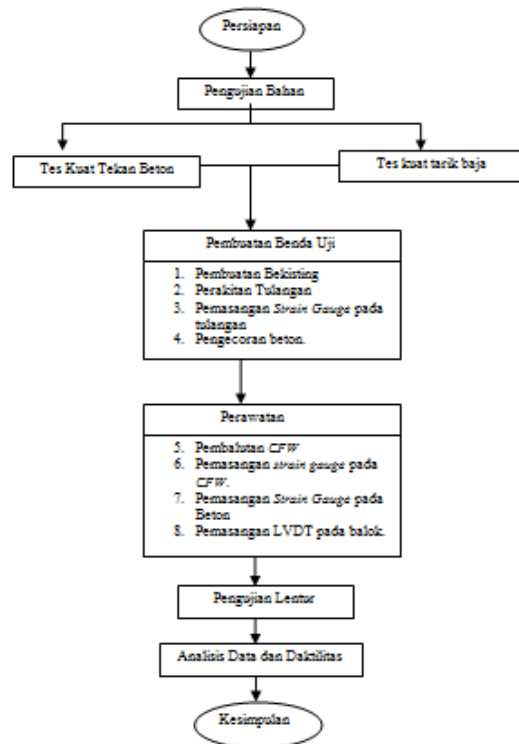
Benda uji balok beton bertulang ditempatkan pada *Loading Frame* dan tumpuan dikondisikan sendi – roll pada kedua ujungnya. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan beban secara monotonik yang bersifat statik dengan interval kenaikan sebesar 200 kg . Bentang bersih balok 2000 mm dan pembebanan dilakukan 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 penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.7. Skema Tahapan Penelitian . Data yang dicatat dalam penelitian ini meliputi :

- Besarnya retak awal akibat pembebanan (*first crack*).
- Beban pada saat terjadi *first crack* yang ditunjukkan di layar *data logger*.
- 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.
- Pola retak dan arah rambatan selama pembebanan berlangsung. Pengamatan ini dapat menggambarkan pola keruntuhan yang terjadi.
- Besarnya beban pada saat runtuh yang di tunjukkan oleh *data logger*.
- Besarnya regangan pada beton, baja dan pada CFW yang ditunjukkan oleh *data logger*).



Gambar.11. *Setting Up* Pengujian balok lentur.



Gambar.12. Skema Tahapan Penelitian.

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 berbeda, karena setiap tulangan memiliki kuat tarik belum tentu sama meskipun memiliki diameter yang sama. Tetapi perbedaan antara 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 $\phi 6 \text{ mm } f_y = 339,9995 \text{ MPa}$, tegangan ultimit rata –rata $f_u = 505,5523 \text{ MPa}$. Untuk Tulangan $\phi 8 \text{ mm } f_y = 383,62915 \text{ MPa}$, tegangan ultimit rata –rata $f_u = 534,8280 \text{ MPa}$. Untuk tulangan D16 mm $f_y = 409,34383 \text{ MPa}$, tegangan ultimit rata –rata $f_u = 593,9870 \text{ MPa}$. 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 $\phi 6, \phi 8$ dan D16.

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 *CFW* memiliki nilai tekan f_c' sebesar 48,43 MPa

Pengujian Balok Beton Bertulang

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

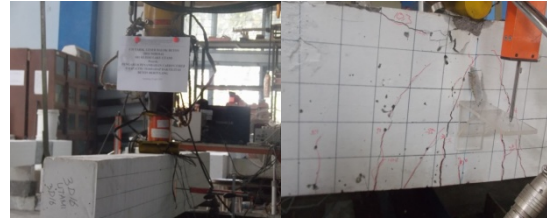


Gambar.13. Grafik beban maksimum yang dapat diterima balok beton bertulang.

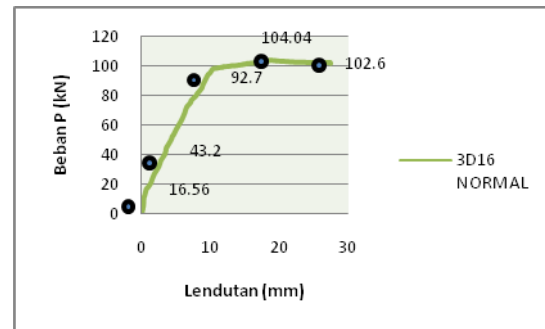
Balok beton bertulang tanpa menggunakan *CFW* (3D16 Normal).

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 15. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 3D16 Normal (tanpa *CFW*).



Gambar 14. Retak awal pada balok 3D16 Normal



Gambar 15. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 3D16 Normal (tanpa *CFW*).

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.

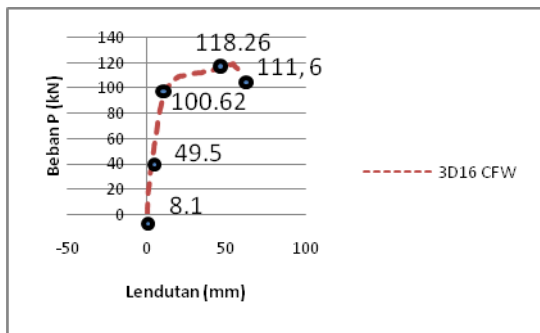
Pada P sebesar 16,56 kN mencapai lendutan sebesar 0,68 mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 43,2 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 3,54 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 3D16 Normal maka diperlukan penambahan P sebesar 92,7 kN mencapai lendutan sebesar 9,46 mm. Pada 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 CFW (3D16 CFW).

Retak Pertama yang terjadi pada balok beton bertulang perkuatan CFW dapat dilihat pada Gambar 16. Retak pertama yang terjadi pada balok 3D16 CFW terjadi saat beban menunjukkan angka sebesar 8,1 kN.



Gambar 16. Retak pertama yang terjadi pada balok 3D16 CFW .



Gambar 17. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 3D16 CFW.

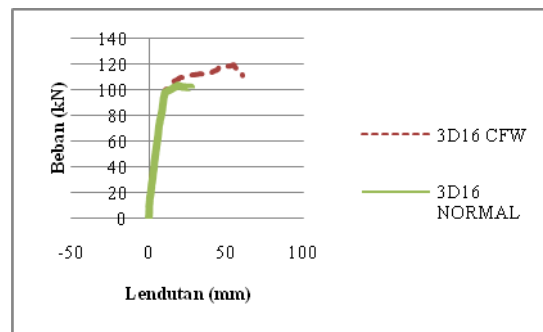
Pada P sebesar 8,1 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0001 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0001. Sedangkan pada P sebesar 49,5 kN memiliki nilai ϵ_c 0,0017 dan nilai ϵ_s sebesar 0,0010. Sedangkan nilai P sebesar 100,62 kN memiliki nilai ϵ_c sebesar 0,0215 dan untuk nilai ϵ_s 0,0171. Sedangkan pada P sebesar 118,26 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 CFW maka diperlukan penambahan P sebesar 100,62 kN mencapai lendutan sebesar 11,42 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 3D16 CFW

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 CFW 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 CFW sebesar 20,5343.

Hasil Pengujian Balok 3D16 Normal dengan Balok 3D16 CFW.

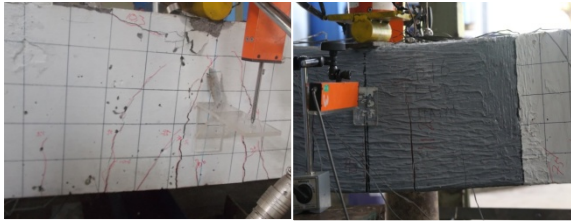
Jika melihat hasil balok 3D16 Normal sebelumnya diperoleh P maksimum sebesar 104,04 kN. Dan penambahan perkuatan CFW menghasilkan P maksimum pada balok 3D16 CFW sebesar 119,52 kN. Dari grafik Gambar. 18. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 3D16 Normal dengan Balok 3D16 perlakuan CFW terlihat bahwa balok yang menggunakan perlakuan dengan CFW mengalami peningkatan pada beban yang diperoleh dari P maksimumnya.



Gambar. 18. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 3D16 Normal dengan Balok 3D16 perlakuan CFW.

Tabel.4. Perhitungan daktilitas pada balok 3D16 Normal dan 3D16 CFW.

No	Benda Uji	δy	δu	$\mu = \delta u / \delta y$	Keterangan
1.	Balok 3D16 Normal	2,76	38,08	13,80	33 % Menin gkat
2.	Balok 3D16 CFW	2,92	59,96	20,53	



Gambar 19. Hasil Pengujian Balok 3D16 Normal dengan Balok 3D16 CFW.

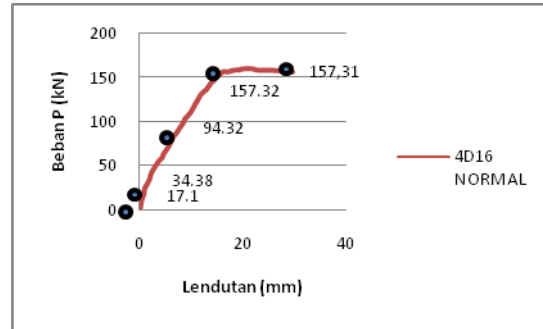
Balok beton bertulang tanpa menggunakan CFW (4D16 Normal).

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



Gambar 20. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 Normal (tanpa CFW).

Retak Pertama yang terjadi pada balok beton bertulang Normal dapat dilihat pada Gambar 20. 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 21. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 4D16 Normal (Tanpa CFW).



Gambar 21. Hubungan antara beban dan lendutan pada balok 4D16 Normal (Tanpa CFW)

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.

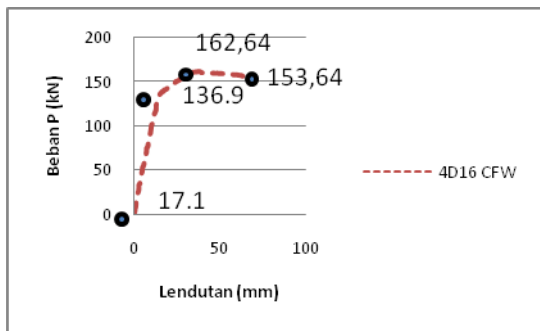
Pada P sebesar 17,1 kN mencapai lendutan sebesar 0,76 mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 34,38 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 1,88 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 4D16 Normal maka diperlukan penambahan P sebesar 94,32 kN mencapai lendutan sebesar 7,84 mm. Sehingga 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 tanpa menggunakan CFW (4D16 CFW).

Retak Pertama yang terjadi pada balok beton bertulang perkuatan CFW dapat dilihat pada Gambar 22. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 CFW terjadi saat beban menunjukkan angka sebesar 17,1 kN. Hubungan antara beban dengan lendutan pada balok beton dengan perkuatan CFW untuk Balok 4D16 CFW ditunjukkan pada Gambar. 18. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 dengan perlakuan CFW menghasilkan P maksimum adalah sebesar 162,64 kN.



Gambar 22. Retak pertama yang terjadi pada balok 4D16 CFW.



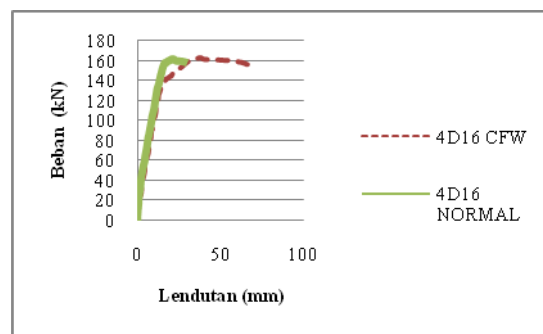
Gambar. 23. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 dengan perlakuan CFW.

Berdasarkan pengujian Balok CFW 4D16 menghasilkan keruntuhan yang sesuai dengan keruntuhan rencana. Pengujian pada balok dengan perlakuan CFW 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.

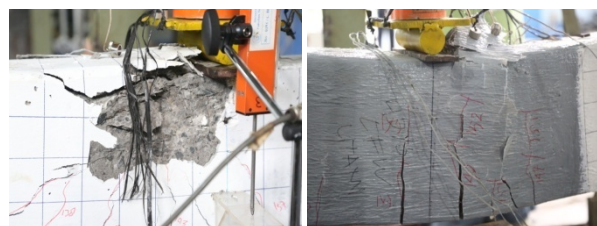
Pada P sebesar 17,1 kN mencapai lendutan sebesar 1,28 mm dan saat P mengalami penambahan beban sebesar 136,9 kN maka lendutan yang di miliki sebesar 14,86 mm. Sehingga untuk mencapai keruntuhan pada balok 4D16 CFW maka diperlukan penambahan P sebesar 162,64 kN mencapai lendutan sebesar 37,1 mm. Pada saat P sebesar 153,64 kN sudah mengalami keruntuhan pada balok 4D16 CFW 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 CFW sebesar 14,7749.

Hasil Pengujian Balok 4D16 Normal dengan Balok 4D16 CFW.

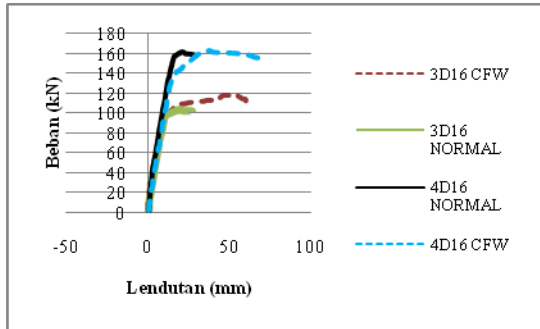
Jika melihat hasil balok 4D16 Normal sebelumnya diperoleh P maksimum sebesar 161,28 kN. Dan penambahan perkuatan CFW menghasilkan P maksimum balok 4D16 CFW sebesar 162,64 kN. Dari grafik Gambar.24. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 Normal dengan 4D16 perlakuan CFW terlihat bahwa balok yang menggunakan perlakuan dengan CFW mengalami peningkatan pada beban yang diperoleh dari P maksimumnya.



Gambar. 24. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 Normal dengan 4D16 perlakuan CFW.



Gambar.25. Hubungan antara beban dan lendutan pada Balok 4D16 Normal dengan 4D16 perlakuan CFW.



Gambar. 26. Perbandingan beban-lendutan balok 3D16 Normal, balok 3D16 CFW, balok 4D16 Normal dan balok 4D16 CFW.

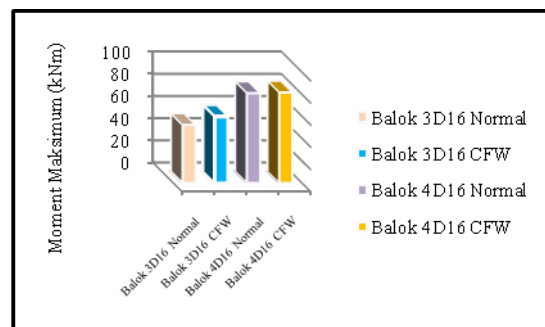
Tabel.6. Perhitungan daktilitas perpindahan pada balok 3D16 Normal, balok 3D16 CFW, balok 4D16 Normal dan 4D16 CFW.

No.	Benda uji	δy	δu	$\mu = \frac{\delta u}{\delta y}$	Keterangan
1	Balok 3D16 Normal	2,76	38,08	13,79 71	33% Meningkat
2	Balok 3D16 CFW	2,92	59,96	20,53 43	
3	Balok 4D16 Normal	3,62	29,58	8,171 3	45% Meningkat
4	Balok 4D16 CFW	4,62	68,3	14,78 36	

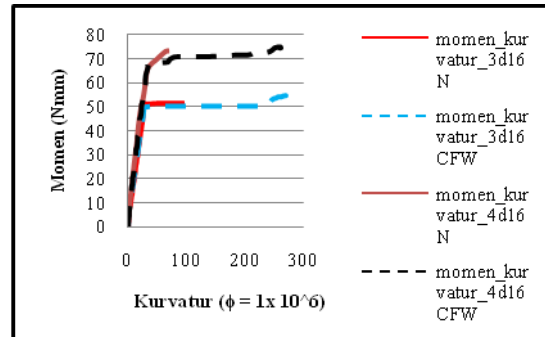
Perhitungan daktilitas pada balok 3D16 Normal, 3D16 CFW, 4D16 Normal dan 4D16 CFW. Penggunaan CFW sangat mempengaruhi dalam pengujian balok beton bertulang sangat mempengaruhi peningkatan daktilitas perpindahan pada balok beton bertulang karena dalam prosentase balok 3D16 Normal dengan balok 3D16 CFW yang mengalami peningkatan daktilitas perpindahan balok sebesar 33% meningkat. Sedangkan pada balok 4D16 Normal dengan balok 4D16 CFW yang mengalami peningkatan daktilitas perpindahan balok sebesar 45% meningkat.

Hasil hubungan momen dan kurvatur dapat disimpulkan bahwa dengan perkuatan CFW ini balok masih dapat menerima beban sebesar beban perkuatan CFW. Balok beton 3D16 Normal memiliki momen nominal sebesar 52,02 kNm sedangkan 3D16 dengan perlakuan CFW memiliki momen maksimum 59,76 kNm. Balok beton 4D16 Normal memiliki kapasitas lentur sebesar 80,64 kNm

sedangkan 4D16 dengan perlakuan CFW memiliki kapasitas lentur 81,32 kNm. Penambahan CFW sangat mempengaruhi dalam pengujian balok beton bertulang sangat mempengaruhi peningkatan kapasitas momen maksimum pada balok beton bertulang karena dalam prosentase balok 3D16 Normal dengan balok 3D16 CFW yang mengalami peningkatan momen maksimum balok sebesar 13% meningkat. Sedangkan pada balok 4D16 Normal dengan balok 4D16 CFW yang mengalami peningkatan momen maksimum balok sebesar 1% meningkat.



Gambar 27. Grafik momen maksimum yang dapat diterima balok beton bertulang.



Gambar 28. Hubungan antara momen dan kurvatur pada balok 3D16 Normal, balok 3D16 CFW, balok 4D16 Normal dan balok 4D16 CFW.

Hasil perbandingan antara beban- lendutan pada Balok Normal dengan Balok Perkuatan CFW. Dari Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan penambahan CFW 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 CFW menghasilkan momen nominal maksimum pada balok 3D16 CFW sebesar 59,76 kNm setelah dilakukan pemotongan pada grafik hubungan antara momen dan kurvatur pada

balok 3D16 CFW 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 CFW momen nominal maksimum yang tercapai 81,32 kNm setelah dilakukan pemotongan pada grafik hubungan antara momen dan kurvatur pada balok 4D16 CFW memiliki nilai momen nominal sebesar 76,57 kNm. Penggunaan CFW sangat mempengaruhi dalam pengujian balok beton bertulang.

Tabel.7. Perhitungan daktilitas kurvatur pada balok 3D16 Normal, 3D16 CFW, 4D16 Normal dan 4D16 CFW

No.	Benda Uji	δy	δu	$\mu = \frac{\delta u}{\delta y}$	Keterangan
1.	Balok 3D16 Normal	8,91 61	96,87 00	10,864 6	63% Meningkat
2.	Balok 3D16 CFW	9,21 01	266,9 682	28,885 5	
3.	Balok 4D16 Normal	8,83 51	71,13 54	8,0514	67% Meningkat
4.	Balok 4D16 CFW	10,3 639	253,0 365	24,402 9	

Penggunaan CFW sangat mempengaruhi dalam pengujian balok beton bertulang sangat mempengaruhi peningkatan daktilitas kurvatur pada balok beton bertulang karena dalam prosentase balok 3D16 Normal dengan balok 3D16 CFW yang mengalami peningkatan daktilitas kurvatur balok sebesar 63% meningkat. Sedangkan pada balok 4D16 Normal dengan balok 4D16 CFW yang mengalami peningkatan daktilitas kurvatur balok sebesar 67% meningkat.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Kapasitas lentur pada balok 3D16 Normal sebesar 51,39 kNm dan balok 3D16 CFW sebesar 54,81 kNm. Sehingga dengan pembalutan CFW sangat mempengaruhi peningkatan kapasitas lentur sebesar 13%. Kapasitas lentur pada balok 4D16 Normal sebesar 75,33 kNm dan balok 4D16 CFW sebesar 76,57 kNm. Sehingga dengan

pembalutan CFW sangat mempengaruhi peningkatan kapasitas lentur sebesar 1%.

2. Daktilitas perpindahan pada balok 3D16 Normal sebesar 13,7971 dan balok 3D16 CFW sebesar 20,5343. Sehingga dengan pembalutan CFW sangat mempengaruhi peningkatan daktilitas sebesar 33% meningkat. Daktilitas perpindahan pada balok 4D16 Normal sebesar 8,1713 dan balok 4D16 CFW sebesar 14,7836. Sehingga dengan pembalutan CFW sangat mempengaruhi peningkatan daktilitas sebesar 45% meningkat.
3. Daktilitas kurvatur pada balok pembalutan CFW secara eksternal pada balok 3D16 CFW, balok 4D16 CFW mengalami peningkatan daktilitas kurvatur dibandingkan dengan balok 3D16 Normal dan balok 4D16 Normal. Dari hasil analisis momen – kurvatur secara berturut – turut untuk balok 3D16 Normal memiliki nilai daktilitas kurvatur sebesar 10,8646 dibandingkan dengan balok yang diberikan perlakuan pembalutan CFW secara eksternal pada balok 3D16 CFW mengalami peningkatan nilai daktilitasnya sebesar 28,9864, peningkatan daktilitas kurvturnya sebesar 63%. Pada balok 4D16 Normal memiliki nilai daktilitas kurvturnya sebesar 8,0514 dibandingkan dengan balok yang diberikan perlakuan pembalutan CFW secara eksternal pada balok 4D16 CFW mengalami peningkatan nilai daktilitasnya sebesar 24,3742, peningkatan nilai daktilitas kurvturnya sebesar 67%.
4. Kondisi kegagalan CFW pada balok normal dan perkuatan CFW adalah rusaknya CFW (sobek), dimana kerusakan CFW lebih dominan pada mengelupasnya CFW dari balok.
5. Berdasarkan pengujian, pemakaian CFW dapat meningkatkan kuat geser dibandingkan dengan balok normal. Dalam hasil analisis perhitungan perencanaan balok normal tanpa perlakuan CFW memiliki kuat geser sebesar 158,5974 kN dan balok yang diberikan perlakuan CFW memiliki kuat geser sebesar 205,9511 kN. Hasil ini membuktikan bahwa dengan benda uji dan pemasangan CFW sesuai pada penelitian 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

- [1] ACI 440.2R-08, 2008, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", ACI Commite 440.
- [2] Nawy, Edward G. 1995. *Reinforced A fundamental Approach*. Department of Civil and Enviromental Engeenering. Rutgers University. The State University of New Jearsey. New Jearsey
- [3] Pangestuti Endah Kanti, 2006, " *Penggunaan Carbon Fiber Reinforced Plate Sebagai Tulangan Eksternal pada Struktur Balok Beton.*" Universitas Negeri Semarang.
- [4] Paulay, T., and Priestley, M.J.N., (1992), " *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [5] Paulay, T., and Priestley, M.J.N., (1992), *Seismic Design of Reinforced Concrete and*
- [6] *Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [7] Prihanantio Januar, Pangestuti Endah Kanti, 2006, " *Analisis Kuat Lentur Balok Beton Bertulang dengan Carbon Fiber Wrap.*" Universitas Diponegoro
- [8] Semarang.
- [9] Semarang.
- [10] Santoso H M, 2000, *Sika Strengthening System*, PT. Sika Nusa Pratama, Semarang.
- [11] SNI – 03 – 2847 – S2013 (2013). "Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung"
- [12] Umbu Nday Albert Aun, 2012, " *Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang Perkuatan Carbon Fiber Wraps (CFW) (Balok Dibebani Oleh Beberapa Kondisi Pembebanan Awal Dan Kemudian Diperkuatan Dengan CFW).*" Universitas Gadjah Mada.