

ANALISIS PERHITUNGAN GESER BALOK NORMAL DENGAN GESER BALOK PERLAKUAN *CARBON FIBER REINFORCED POLYMER (CFRP)* TERHADAP BALOK BETON BERTULANG

Sri Rejeki Laku Utami^{1*}, Kartika Hapsari Sutantiningrum²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Rekayasa, Universitas Selamat Sri
Jl. Soekarno Hatta KM.03 Kendal Indonesia

*Email: admin@uniss.ac.id, udhitami@gmail.com

ABSTRAK

Pengaruh *Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)* pada balok beton bertulang diharapkan memberikan kontribusi terhadap peningkatan daktilitas. Pada penelitian 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. Serta memiliki nilai geser balok normal sebesar 158,5974 kN dibandingkan dengan balok perlakuan *CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)* sebesar 205,9511 kN, Nilai geser balok dengan perlakuan *CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)* memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan balok normal.

Kata Kunci: analisis geser balok, *CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)*, kuat lentur

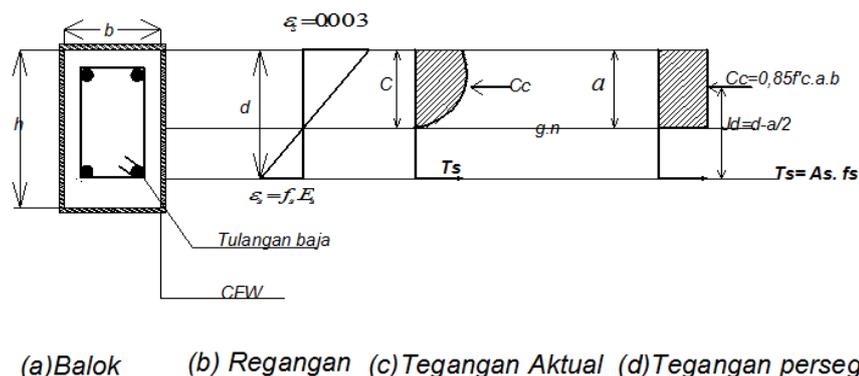
ABSTRACT

*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. And has a sliding value normal beam of 158,5974 kN compared to treatment beams *CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)* value is 205,9511 kN Shear value of the beam with treatment *CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)* has a higher value than the normal beam.*

Keyword : analysis slide beam, *CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer)*, flexural strength

1. 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* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) 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 $Jd_2 > Jd_1$ sehingga $M_2 > M_1$ seperti terlihat pada Gambar 1. Pengaruh penempatan tulangan baja terhadap jarak jd pada diagram tegangan. 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 kekauan yang cukup. Sehingga struktur bangunan gedung tersebut tetap berdiri walaupun sudah berada dalam kondisi plastis. Penambahan tulangan tekan $2\phi 6$ mm untuk mempengaruhi tulangan tekan sangat kecil dan untuk memperkecil pengaruh tulangan tekan dengan adanya penambahan *CFRP* agar beton terkekang (*external confinement*). 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. Dari latar belakang permasalahan di atas maka perlu dilakukan penelitian tentang “Pengaruh *CFRP* (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) Terhadap 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 *CFRP* terhadap balok beton bertulang. Sebagai masukan standar / Code SNI dan perngaruh *CFRP* pada balok bertulang.

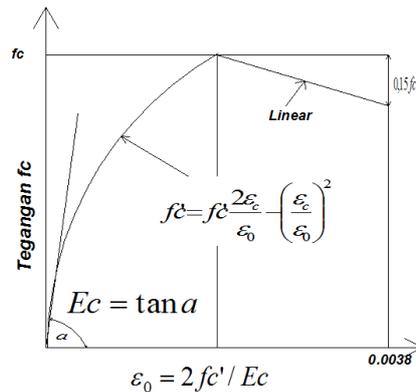
Agar penelitian dan eksperimen dapat terarah sesuai tujuan yang diharapkan, dipakai anggapan dasar dan batasan bahan sebagai berikut :

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 balok.

2. LANDASAN TEORI

2.1 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 2.1. 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*)

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

Untuk daerah AB ($0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co}$) harga $k=1$ jika $\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} \leq 1$

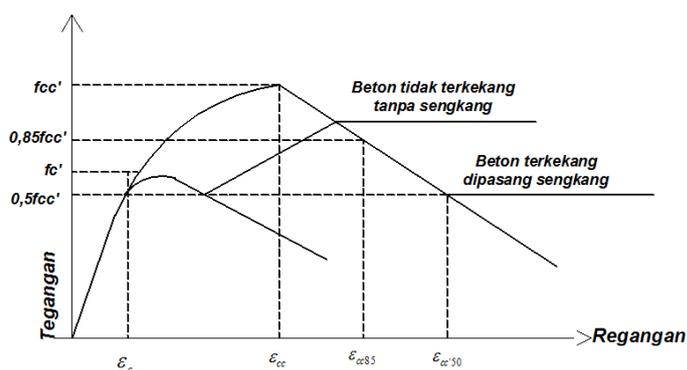
Untuk daerah BC ($\varepsilon_c > \varepsilon_{co}$) harga $k = 0,67 + \frac{f_c'}{62}$ Mpa jika $\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o} > 1$

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

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

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

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.

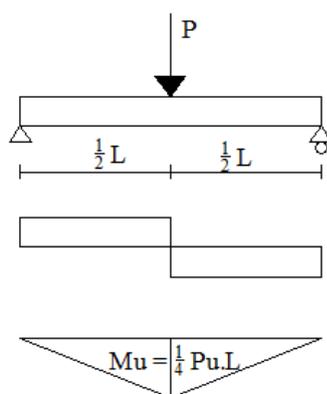


Gambar 3. Grafik tegangan- regangan beton terkekang dan beton tidak terkekang.

Pada Gambar 3. Grafik tegangan- regangan beton terkekang dan beton tidak terkekang, terlihat bahwa pada tegangan awal modulus elastisitas 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 $0,5 fc'$. kemiringan garis lurus bagian awal kurva (pada daerah elastis) didefinisikan sebagai modulus elastisitas E_c . Untuk kurva hubungan tegangan –regangan *Hognestad*.

2. 2 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.



Gambar 4. Pola Pembebanan

$$Cc = Ts \Rightarrow Cc = 0,85 \cdot fc' \cdot ab \cdot b \dots\dots\dots (1)$$

$$T_s = A_s \cdot f_y \cdot c_b = 0,003 \cdot d / (0,003 + \epsilon_s \text{ bila } \epsilon_s = f_y / E_s \text{ dengan } E_s = 200.000 \text{ Mpa, maka } c_b = 600 \cdot d / (600 + f_y) \dots\dots\dots (2)$$

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

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

maka digunakan $\Rightarrow a = 0,75 \cdot a_b = \beta_1 \cdot 450 \cdot d / (600 + f_y)$, a merupakan fungsi dari d (β_1 dan f_y diketahui).....(5)

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

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

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.

2.3 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.

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

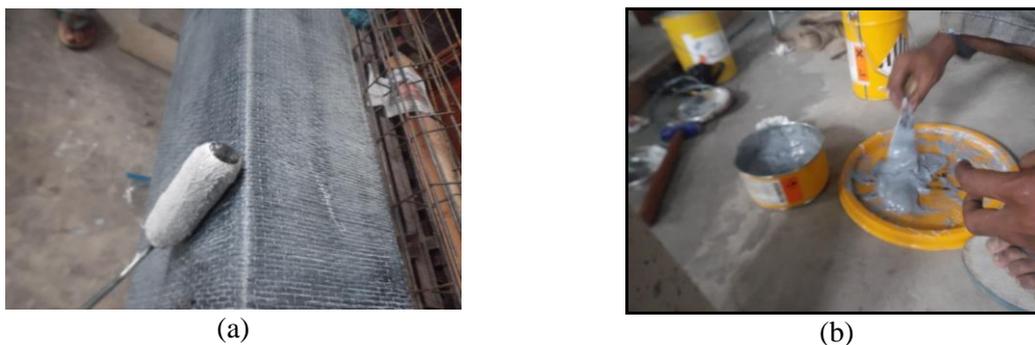
2.4 CFRP

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*

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
Thickness	fibre content)
Width	500 mm
Fabric Length / roll	100 m

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



Gambar 5. a) Cara Pemakaian *CFRP* jenis Sika Hex 231 C., b) *Epoxy adhesives* jenis Sikadur®-330.

2.5 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 $1.30 \pm 0.1 \text{ kg/l (part A+B) (at } +23^{\circ}\text{C)}$ (*evacuated*) yang di oleskan pada permukaan beton.

2.6 Review Penelitian Balok Yang Dipasang *CFRP*

Sri Rejeki Laku Utami (2016) mengungkapkan bahwa untuk melakukan penelitian dengan *CFW (Carbon Fiber Wraps)* yang dilakukan dengan 4 benda uji yaitu 1 buah balok uji sebagai balok normal tanpa perlakuan *CFW (Carbon Fiber Wraps)* dengan dimensi balok 3D16, dan 1 buah balok 3D16 dengan perlakuan *CFW (Carbon Fiber Wraps)* 3D16 *CFW*, 1 buah balok normal tanpa perlakuan *CFW* dengan dimensi 4D16 dan 1 buah balok 4D16 dengan perlakuan *CFW (Carbon Fiber Wraps)*. Balok beton bertulang bentang 2000 mm dengan lebar 150 mm dan tinggi 250 mm. Benda uji terbuat dari beton dengan kuat tekan $f'_c = 30 \text{ Mpa}$. 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%.

3. METODOLOGI PENELITIAN

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 $f'_c = 30 \text{ Mpa}$. Balok uji mempunyai penampang persegi dengan ukuran lebar 150 mm, tinggi 250 mm dan bentang 2000 mm. Dengan tulangan tarik dengan diameter 16 mm (3Ø 16), (4Ø 16) dan (5 Ø 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 *undereinforced*. 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. 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 *CFRP* pada balok 3D16 dengan perlakuan *CFRP*, balok 4D16 *CFRP* serta balok 5D16 sepanjang 600 mm (2,4 h) ditengah 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 <i>CFRP</i>
2.	1 Balok dengan Tulangan tarik 3D16	Diperkuat dengan <i>CFRP</i>
3.	1 Balok Normal dengan Tulangan tarik 4D16	Tanpa <i>CFRP</i>
4.	1 Balok dengan Tulangan tarik 4D16	Diperkuat dengan <i>CFRP</i>
5	1 Balok dengan Tulangan Tarik 5D16	Diperkuat dengan <i>CFRP</i> .

3.1 Pemasangan Strain Gauge

Untuk mengetahui besarnya regangan pada beton, tulangan maupun *CFRP* 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 *CFRP*, 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 *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.

3.2 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.

3.2.1 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.

3.2.2 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 memperkasar 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.

3.2.3 Persiapan *CFRP*

CFRP dipotong- potong sesuai dengan ukuran desain yang telah direncanakan. Pada penelitian 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.

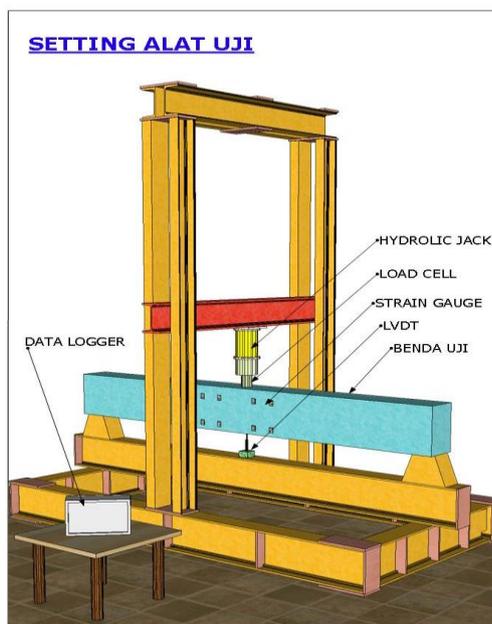
3.2.4 Pengeleman *CFRP* Pada Balok

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 *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.

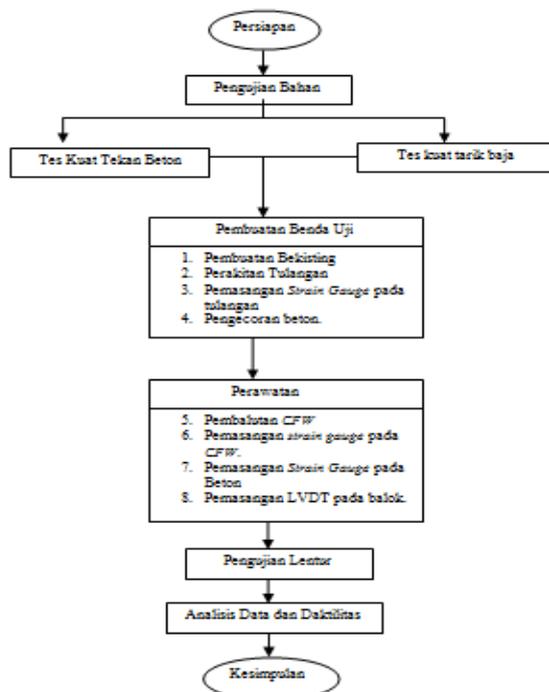
3.2.5 Set Up Pengujian

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 6. *Setting Up* Pengujian balok lentur, sedangkan alur dalam penelitian dapat dilihat pada Gambar 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 *CFRP* yang ditunjukkan oleh *data logger*.



Gambar 6. *Setting Up* Pengujian balok lentur



Gambar 7. Skema Tahapan Penelitian

4. ANALISIS DATA

4.1 Pengujuan 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 $\phi 6$ mm $f_y = 339,9995$ MPa, tegangan ultimit rata –rata $f_u = 505,5523$ MPa. Untuk Tulangan $\phi 8$ 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.

4.2 Pengujuan 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.

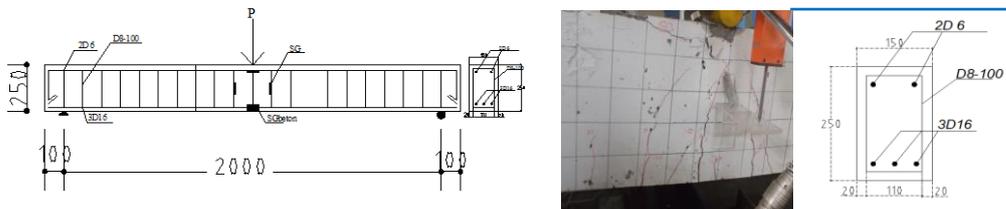
4.3 Pengujuan Balok Beton Bertulang

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 8. Grafik beban maksimum yang dapat diterima balok beton bertulang

4.4 Analisis Perhitungan Geser balok Normal tanpa perlakuan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).



Gambar 9. Design perencanaan balok Normal tanpa perlakuan CFRP

Adapun untuk analisis Perhitungan Geser balok Normal sebagai berikut :

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f_c'} \cdot b \cdot d \Rightarrow (SNI - 03 - 2847 - S 2013)$$

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{30} \cdot 150 \cdot 220$$

$$V_c = 30124,7407 \text{ N}$$

$$V_c = 30,1247 \text{ kN}$$

$$f_{yv} = 240 \text{ MPa}$$

$$s = 100 \text{ mm}$$

$$A_v = 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

$$A_v = 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 7,7^2 = 93,1325 \text{ mm}^2$$

$$\rho_v = \frac{A_v}{b \cdot 100} \Rightarrow \rho_v = \frac{46,5663}{150 \cdot 100} \Rightarrow \rho_v = 0,00621 \text{ mm}^2$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_{yv} \cdot d}{s}$$

$$V_s = \frac{93,1325 \cdot 240 \cdot 220}{100}$$

$$V_s = 49173,8675 \text{ N}$$

$$V_s = 49,1740 \text{ kN}$$

$$V_n = V_c + V_s$$

$$V_n = 30,1247 + 49,1740 = 79,2987 \text{ kN}$$

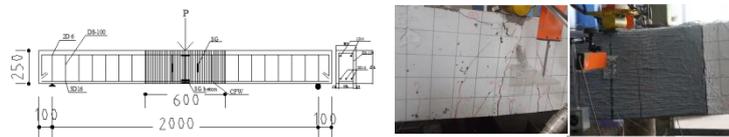
$$V_u \leq V_n$$

$$0,5P = 79,2987$$

$$P = 158,5974 \text{ kN}$$

Jadi, beban maksimum yang dibutuhkan agar balok runtuh akibat geser adalah sebesar 158,5974 kN.

4.5 Analisis Perhitungan Geser balok perlakuan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).



Gambar 10. Design Perencanaan balok dengan perlakuan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer).

Perhitungan Geser balok dengan perlakuan CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) sebagai berikut :

Perhitungan perkuatan geser balok yang dilapisi CFRP (ACI 440.2R-08,2008).

- Kuat Tarik (f_{cfw}) : 4.800 N/ mm² (Sika Wrap Hex 231 C)
- Elastisitas (E_{cfw}) : 234.000 N/ mm² (Sika Wrap Hex 231 C)
- Regangan (ϵ_{CFRP}) : 0,018 (Sika Wrap Hex 231 C)
- Ketebalan CFRP (t_f) : 0,131 mm (Sika Wrap Hex 231 C)
- Berat isi CFRP : 1,76 g/cm³. (Sika Wrap Hex 231 C)
- Lebar CFRP (w_f) : 600 mm
- Tinggi CFRP (h_f) : 250 mm
- Spasi CFRP (s_f) : 100 mm
- f_c' : 30MPa (Perkiraan mutu beton saat pengujian)
- CE : 0,95 Completely Wrapped Member (ACI 404.2R-08,2008).
- Le : active bond length (mm)
- k_1/k_2 : Type of wrapping scheme used.
- k_v : The effective strain is calculated using a bond-reduction coefficient.

$$\epsilon_{fu} = C_E \cdot \epsilon_{fu} = 0,95 \cdot 0,018 = 0,0171$$

$$n_f : \text{1kali lapis pembalutan C} \quad Le = \frac{23300}{(n_f \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}} = \frac{23300}{1 \times 0,131 \times 234000)^{0,58}} = 58,2362 \text{ mm}$$

$$k_1 = \left(\frac{f_c'}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{30}{27} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,4115$$

$$k_2 = \frac{d_{cfw} - Le}{d_{cfw}} = \frac{250 - 58,2362}{250} = 0,7671$$

$$K_v = \frac{k_1 \cdot k_2 \cdot Le}{11900 \cdot \epsilon_{fu}} = \frac{0,4115 \times 0,7671 \times 58,2362}{11900 \times 0,0171} = 0,09034 \quad (K_v \leq 0,75 \text{ _memenuhi_ syarat})$$

$$\epsilon_{fe} = K_v \cdot \epsilon_{fu} = 0,09034 \times 0,0171 = 0,0015$$

$$A_{fv} = 2n_f \cdot w_f \cdot t_f = 2 \times 1 \times 0,131 \times 600 = 157,200 \text{ mm}^2$$

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} \cdot E_f = 0,0015 \times 234 = 0,3615 \text{ kN / mm}^2$$

$$V_{CFW} = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_{fv}}{S_f} = \frac{157,200 \times 0,3615 \times 1 \times 250}{600} = 23,67684 \text{ kN}$$

Jadi kontribusi kuat geser CFRP pada balok adalah sebesar $23,67684\text{ kN}$.

Sedangkan P geser prediksi dengan CFRP adalah

$$V_{\text{total}} = V_c + V_s + V_{\text{cfw}}$$

$$V_{\text{total}} = 30,1247\text{ kN} + 49,1740\text{ kN} + 23,67684 = 102,9756\text{ kN}$$

$$V_u \leq V_n$$

$$0,5P = 102,9756\text{ kN}$$

$$P = 205,9511\text{ kN}$$

Jadi, beban maksimum yang dibutuhkan agar balok runtuh akibat geser adalah sebesar

$$P = 205,9511\text{ kN}.$$

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Kondisi kegagalan *CFRP* pada balok normal dan perkuatan *CFRP* adalah rusaknya *CFRP* (sobek), dimana kerusakan *CFRP* lebih dominan pada mengelupasnya *CFRP* dari balok.
2. 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 $158,5974\text{ kN}$ dan balok yang diberikan perlakuan *CFRP* memiliki kuat geser sebesar $205,9511\text{ kN}$. Hasil ini membuktikan bahwa dengan benda uji dan pemasangan *CFRP* 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.

5.2 Saran

Dari penelitian yang telah dilakukan beberapa saran dan rekomendasi untuk memperbaiki penelitian selanjutnya diantaranya adalah :

1. Perlu dilakukan pengujian pada balok dalam skala penuh (*Full Scale*) hal ini dimaksudkan agar memberikan nilai peningkatan struktur yang lebih valid.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai jarak tinggi efektif *CFRP* untuk memberikan nilai kuat geser yang paling optimum. Dengan panjang pemasangan *CFRP* yang sama dan variasi posisi pemasangan *CFRP* yang dimulai dari ujung bawah balok, As Tulangan utama dan dari ujung atas balok pada penelitian. Berdasarkan variasi tersebut dapat diketahui bagaimana karakter kuat geser masing masing benda uji, sehingga dapat diketahui pemasangan *CFRP* yang paling optimum dipasang dari posisi mana.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui seberapa besar pengaruh beton dan tulangan geser dalam hal geser balok pada balok perkuatan *CFRP*.

DAFTAR PUSTAKA

- 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
- Paulay, T., and Priestley, M.J.N., (1992), "*Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*", John Wiley & Sons, Inc., New York.
- 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"
- Sri Rejeki Laku Utami, 2016, "Pengaruh Pembalutan Carbon Fiber Wrap (CFW) Terhadap Daktilitas Balok Beton Bertulang." Universitas Diponegoro.
- Sri Rejeki Laku Utami, 2019, "Pengaruh Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Terhadap Balok Beton Bertulang." Universitas Selamat Sri".