

# Kajian Perilaku Lentur Perbaikan Balok Beton Bertulang dengan Metode *External Prestressing*

DIDA KHRISNA<sup>1</sup>, HAZAIRIN<sup>2</sup>, BERNARDINUS HERBUDIMAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan  
Institut Teknologi Nasional, Bandung

<sup>2</sup>Pembimbing, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan  
Institut Teknologi Nasional, Bandung  
Email: dida\_khrisna@yahoo.com

## ABSTRAK

*Seiring jalannya umur pemakaian beton bertulang pada struktur bangunan, banyak kondisi beton yang sudah rusak atau tidak aman untuk digunakan dikarenakan degradasi kekuatan akibat bencana alam, penempatan beban yang melebihi kapasitas, kebakaran, dan juga material bermutu rendah. Melihat kenyataan di lapangan tidak semua pelaku industri memiliki peralatan yang canggih ataupun budget yang mumpuni untuk melakukan perbaikan struktur, oleh karena itu metode external prestressing muncul sebagai salah satu opsi perbaikan struktur pada beton bertulang. Pada cara ini batang atau kabel prestressing ditanam pada beton yang rusak, memberikan tegangan padanya sampai suatu tegangan tarik tertentu sehingga elemen yang rusak mendapat gaya tekan. Hasil pengujian terhadap 4 balok dengan dimensi 25 cm x 15 cm dan panjang bentang 90 cm menunjukkan bahwa perbaikan perilaku lentur balok dengan metode external prestressing menghasilkan persentase nilai-nilai sebagai berikut; 76,647%; 81,369%; 77,763%; 90,041%.*

**Kata kunci:** *external prestressing, perilaku lentur, perbaikan struktur*

## ABSTRACT

*After long service of reinforced concrete structure, concrete beam element become damage due to natural disasters, overloading, burned, and degradation of material strength. Repairing this element to achieve initial the strength capacity needs high cost. Then, the external pre-stressing method appears as alternative method to repair the element structure with relatively simple method and low cost. In this method, the pre-stress cable is attached beside the damaged concrete beam, giving the post-tension force, then the concrete section has compression force. The result of the 4 testing beams with 25 cm x 15 cm and length 90 cm shows that the improvement of beams flexural behavior with external prestressing method produces several percentage improvement values with these improvement; 76.647%; 81.369%; 77.763%; 90.041%.*

**Keywords :** *external prestressing, flexural behavior, structural improvement*

## 1. PENDAHULUAN

Sebagai usaha untuk mencoba mempertahankan fungsi bangunan agar masih bisa digunakan maka struktur beton tersebut haruslah diperbaiki daripada harus dibongkar ulang secara keseluruhan agar tidak menghabiskan lebih banyak biaya dan waktu, serta mengurangi limbah bangunan.

Banyak metode yang sudah sering digunakan untuk memperbaiki struktur yang rusak, seperti; grouting, kevlar, dan *external prestressing*. Melihat kenyataan di lapangan tidak semua pelaku industri memiliki peralatan yang canggih ataupun anggaran yang mumpuni untuk melakukan perbaikan struktur, maka dari itu metode *external prestressing* muncul sebagai salah satu opsi perbaikan struktur pada beton bertulang.

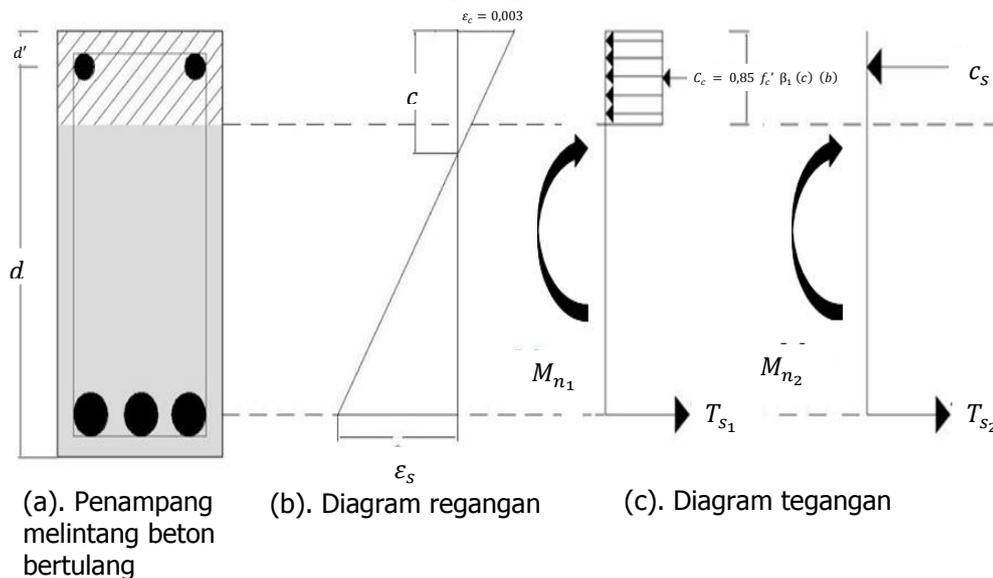
## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Beton adalah campuran antara semen portland atau semen hidrolis yang lain, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan tambahan yang membentuk massa padat (SNI-03-2847-2002). Seiring dengan penambahan umur, beton akan semakin mengeras dan akan mencapai kekuatan rencana  $f_c'$  pada usia 28 hari.

Kekuatan tekan merupakan salah satu kinerja utama beton. Kekuatan tekan adalah kemampuan beton untuk dapat menerima gaya per satuan luas (Tri Mulyono, 2004). Nilai kekuatan beton diketahui dengan melakukan pengujian kuat tekan terhadap benda uji berbentuk silinder ataupun kubus pada umur 28 hari yang dibebani dengan gaya tekan sampai mencapai beban maksimum. Beban maksimum didapat dari pengujian dengan menggunakan alat *compression testing machine*. Material yang digunakan untuk membuat beton pada umumnya adalah; semen, agregat, dan air.

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya (SNI 03- 2847 – 2002, Pasal 3.13).

Jika ada 2 buah gaya sama besar yang bekerja dengan arah berlawanan pada jarak tertentu, maka dapat menimbulkan momen yang besarnya sama dengan gaya yang bekerja dikalikan dengan lengan momennya seperti pada **Gambar 1**.



**Gambar 1. Gambar diagram regangan dan tegangan pada balok**

Pada penampang beton bertulang rangkap seperti pada **Gambar 1**, pada bagian atas bekerja 2 buah gaya tekan ke kiri ( $C_c$  dan  $C_s$ ) dengan nilai  $C_c$  (resultan tegangan tekan  $f_c$  pada beton) dan  $C_s$  (gaya tekan pada tulangan tekan), sedangkan penampang bagian bawah bekerja juga 2 buah gaya tarik ke kanan ( $T_{s_1}$  dan  $T_{s_2}$ ) (lihat **Gambar 1 (c)**) dengan nilai  $T_{s_1}$  (resultan tegangan tarik pada tulangan tunggal) dan  $T_{s_2}$  (resultan tegangan tarik pada tulangan pasangan gaya).

Gaya tekan dan gaya tarik tersebut sama besar dan bekerja berlawanan arah sehingga menghasilkan momen yang disebut momen nominal aktual ( $M_n$ ). Selanjutnya, karena gaya tekan pada penampang balok ada 2 macam ( $C_c$  dan  $C_s$ ), maka momen nominal  $M_n$  yang terjadi pada hakikatnya merupakan jumlah antara momen nominal yang dihasilkan dari gaya tekan beton  $C_c$  yang dikalikan oleh panjang lengan momen dari  $C_c$  atau dinotasikan dengan  $z_1$ , dan momen nominal yang dihasilkan dari gaya tekan baja tulangan  $C_s$  yang dikalikan dengan panjang lengan momennya ( $z_2$ ).

Menurut Asroni, A. (2010) kerusakan yang terjadi umumnya dapat dikelompokkan dalam tiga katagori yaitu; retak (*cracks*), *voids*, *scalling/spalling/erosion*. Keruntuhan yang terjadi pada struktur beton bertulang ada dua jenis, yaitu; keruntuhan lentur dan keruntuhan geser. Jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada balok lentur bergantung pada sifat penampang balok, dan dibedakan menjadi 3 jenis berikut, yaitu; *under reinforced*, *balanced*, dan *over reinforced*. Runtuh geser adalah retak miring yang terjadi akibat kegagalan balok dalam menahan geser yang biasanya hal ini terjadi pada daerah ujung (dekat tumpuan) balok karena pada daerah ini timbul gaya geser/gaya lintang paling besar.

Menurut Asroni, A (2010) dalam praktek pelaksanaan struktur beton bertulang dimungkinkan terjadinya pengurangan (reduksi) dari kualitas material, mutu pelaksanaan dan lain-lain yang berakibat menurunnya kekuatan. Oleh karena itu terjadinya kemungkinan reduksi ini harus diperhitungkan dalam perhitungan struktur beton bertulang.

Menurut Raju, N.K. (1981) beton prategang adalah suatu metode untuk mengatasi kekurangan dari sifat beton, yaitu tegangan tarik. Biasanya beton prategang digunakan pada struktur balok dan gelagar pada jembatan dengan bentang panjang. Kabel prategang biasanya terbuat dari kabel baja berkekuatan tarik tinggi atau yang sering disebut *high tensile steel cable* digunakan untuk memberikan tegangan tekan yang menyeimbangkan tegangan tarik yang terjadi pada bidang prategang yang biasanya pada struktur beton bertulang tegangan tarik tersebut dipikul oleh tulangan-tulangan. Pemberian gaya prategang pada beton biasanya dilakukan dengan 2 cara, yaitu; pra-tarik dan pasca-tarik.

Teknik pengerjaan dengan metode *external prestressing* telah menjadi metode penting di dunia konstruksi terutama untuk memperkuat dan memperbaiki aneka ragam struktur beton bertulang. Menurut Hakan Nordin (2005) bahwa perbaikan struktur menggunakan external prestressing sangat efektif untuk memperkuat struktur, selain lebih mengeluarkan tenaga yang kecil untuk memberikan gayanya, biayanya pun lebih murah. Sejak penggunaannya, metode ini banyak memberikan keuntungan, antara lain perilaku elastis balok pada beban yang lebih tinggi, menaikkan kapasitas maksimal pembebanan.

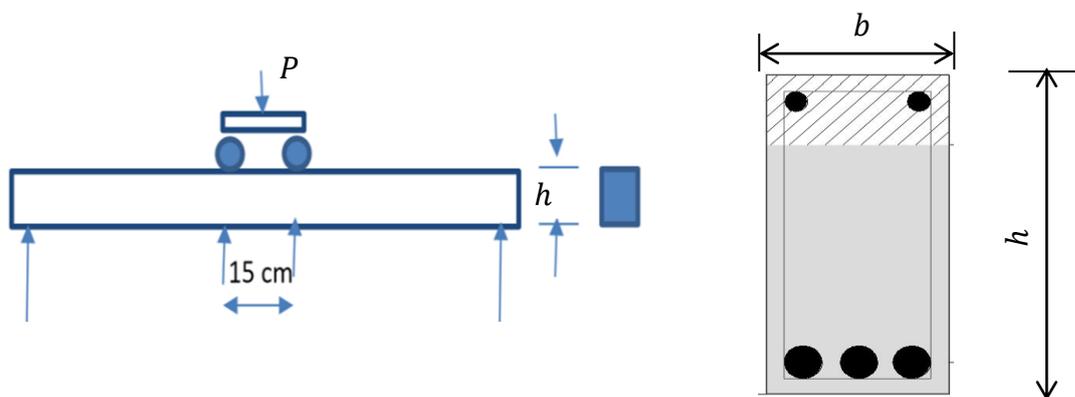
### 3. METODE PENELITIAN

Tahap pertama yang dilakukan dalam melakukan penelitian adalah mencari dan memilih topik permasalahan yang akan menjadi fokus penelitian.

Sebelum penelitian dimulai, terlebih dahulu dilakukan studi literatur atau biasa disebut juga tinjauan pustaka. Studi literatur berisi tentang teori-teori, temuan dan bahan lain yang diperoleh dari acuan yang dijadikan landasan untuk melakukan kajian. Dalam hal ini, yang ditinjau hanya nilai perbaikan yang terjadi pada 4 buah balok yang menjadi benda uji penelitian. Pertama direncanakan terlebih dahulu spesifikasi balok yang akan digunakan dan dihitung kapasitas pembebanannya, kemudian setelah dilakukan pengujian bahan didapat spesifikasi aktual bahan yang akan digunakan sebagai benda uji, berdasarkan spesifikasi aktual maka didapatkan nilai kapasitas pembebanan yang baru, setelah didapatkan beberapa nilai dari hasil pengujian maka hasil tersebut dianalisis sehingga bisa ditarik kesimpulan dari hasil pengujian di laboratorium.

Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini adalah kuat tekan beton. Pengujian sifat-sifat mekanik beton tersebut dilakukan setelah beton berumur 28 hari. Pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Institut Teknologi Nasional. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah beton yang dihasilkan memiliki kuat tekan yang sesuai dengan kuat tekan yang direncanakan

Pengujian lentur balok dilakukan dengan metode *third point loading*, dimana tujuan dari digunakannya metode ini adalah agar menghasilkan momen lentur murni. Ilustrasi *set-up* pengujian tertera pada **Gambar 2**.



**Gambar 2. Gambar *set-up* pengujian *third point loading* dan penampang melintang balok**

Pengujian dengan cara *external prestressing* dilakukan dengan cara batang atau kabel *prestressing* ditanam pada beton yang rusak, memberikan tegangan padanya sampai suatu tegangan tarik tertentu lalu mengangkerkannya sehingga elemen yang rusak mendapat gaya tekan.

Setelah balok diperbaiki dengan metode *external prestress*, benda uji diuji lentur kembali untuk mengetahui seberapa besar perbaikan perilaku lentur balok.

#### 4. PENGOLAHAN DAN ANALISIS HASIL PENGUJIAN

Hasil pengujian bahan menunjukkan bahwa dengan mutu beton 25,9 MPa dan spesifikasi baja tulangan diameter 12 mm (diameter uji 11,75 mm) dengan tegangan leleh sebesar 380 MPa serta spesifikasi baja tulangan diameter 8 mm (diameter uji 7,56 mm) dengan tegangan leleh sebesar 260 MPa dengan **Persamaan 1** nilai  $A_s$  dan  $A_s'$  dapat diperoleh.

$$A_s = \frac{1}{4} \pi d^2 \quad \dots (1)$$

dengan:

$A_s$  = luas penampang,

$\pi$  = konstanta perhitungan luas lingkaran,  
 $d$  = diameter baja tulangan.

Setelah memasukan data diameter baja tulangan ke **Persamaan 1** maka diperoleh nilai  $A_s = 325,3 \text{ mm}^2$  dan  $A_s' = 89,77 \text{ mm}^2$ .

Langkah selanjutnya adalah menghitung gaya-gaya yang bekerja pada struktur balok dengan menggunakan **Persamaan 2 sampai Persamaan 4**:

$$C_c = 0,85 f_c' \beta_1 (c) (b) \quad \dots (2)$$

$$C_s = A_s' F_s' \quad \dots (3)$$

$$T_s = A_s f_{y1} \quad \dots (4)$$

dengan:

$C_c$  = gaya tekan beton,  
 $f_c'$  = kuat tekan beton (MPa),  
 $\beta$  = faktor tinggi blok tegangan,  
 $c$  = tinggi penampang tertekan,  
 $b$  = lebar penampang balok,  
 $C_s$  = gaya tarik penampang beton,  
 $A_s'$  = luas tulangan tarik,  
 $F_s'$  = gaya pada tulangan tarik,  
 $T_s$  = gaya tarik tulangan baja,  
 $f_{y1}$  = tegangan leleh baja tulangan tarik.

Hasil perhitungan adalah nilai  $C_c = 105.556,7515 \text{ N}$ ,  $C_s = 18.055,214 \text{ N}$ ,  $T_{s1} = 111.112,1918 \text{ N}$ ,  $T_{s2} = 18.057,417 \text{ N}$ .

Setelah menghitung gaya-gaya yang bekerja, kemudian dihitung lengan momen pada balok yaitu  $z_1$  dan  $z_2$ .

$$z_1 = d - \frac{\beta_1 c}{2} \quad \dots (5.a)$$

$$z_2 = d - d' \quad \dots (5.b)$$

dengan:

$c$  = tinggi sumbu netral penampang,  
 $d$  = tinggi efektif penampang,  
 $d'$  = tinggi selimut beton.

Dengan **Persamaan 5.a** dan **Persamaan 5.b** diperoleh nilai  $z_1 = 209,017 \text{ mm}$  dan  $z_2 = 200 \text{ mm}$ .

Setelah didapatkan gaya yang bekerja dan lengan momennya, maka didapatkan nilai momen dengan **Persamaan 6 dan Persamaan 7**:

$$M_{n_1} = c_c z_1 \quad \dots (6)$$

$$M_{n_2} = c_s z_2 \quad \dots (7)$$

dengan:

$z_1$  = panjang lengan momen  $C_c$ ,

$z_2$  = panjang lengan momen  $C_s$ ,

maka  $M_{n_1} = 22.063.155,53$  N.mm dan  $M_{n_2} = 3.611.402,8$  N.mm, sehingga menghasilkan  $\Sigma M_n = 25.674.198,33$  N.mm

Setelah diperoleh nilai  $\Sigma M_n$  maka beban pengujian terhitung bisa diperoleh melalui cara statika sebesar 13.692,886 N.

Gaya prategang yang dibutuhkan dapat dihitung dengan **Persamaan 8**:

$$\sigma = -\frac{P}{A} + \left(\frac{My}{I}\right) \quad \dots (8)$$

dengan:

$\sigma$  = gaya tarik yang bekerja pada balok,

$P$  = gaya prategang yang diberikan,

$A$  = luas penampang balok,

$M$  = momen maksimum yang terjadi pada balok,

$Y$  = jarak titik berat ke tepi penampang,

$I$  = inersia penampang.

Dengan asumsi bahwa gaya yang diberikan merupakan gaya prategang penuh sehingga nilai  $\sigma = 0$  dan  $P$  merupakan gaya prategang yang diberikan maka diperoleh nilai  $P$  rencana sebesar 6,16 ton.

Diketahui gaya lintang atau geser  $V_u$  yang terjadi pada balok adalah sebesar 68,46 kN atau jika dikonversi ke satuan kilogram akan diperoleh nilai 68.460 N. Setelah mendapatkan nilai  $V_u$  maka langkah selanjutnya untuk menentukan kapasitas nilai kekuatan geser balok adalah menentukan nilai kemampuan penampang beton menerima geser  $V_c$  yang dapat diperoleh melalui rumus  $V_c = (b)(d) \frac{\sqrt{f_c'}}{6}$ . Diperoleh nilai  $V_c$  sebesar 28626,77 N dengan nilai  $V_u > V_c$ . Dengan membandingkan nilai  $V_c$  terhadap  $V_n$ , diperoleh  $V_n > V_c$  yang berarti balok memerlukan tulangan geser. Ditinjau dari rumus  $V_n = V_c + V_s$  dengan  $V_s$  adalah gaya geser yang dipikul atau dibebankan terhadap tulangan geser maka diperoleh nilai  $V_s$  adalah sebesar 39.833,23 N.

Setelah mendapatkan nilai  $V_s$ , langkah selanjutnya adalah menghitung jarak antar sengkang ( $s$ ) berdasarkan rumus  $A_v = \frac{V_s x s}{f_y x d}$

$A_v = 2 x 0,25 x \pi x 7,562$ , nilai  $V_s = 39833,23$  N, nilai  $f_y = 260$  MPa, dan  $d=250$  mm, maka didapatkan nilai  $s = 146,498$  mm.

Nilai kapasitas penampang hasil pengujian dapat dilihat pada **Tabel 1** berikut.

**Tabel 1. Resume Nilai Kapasitas Penampang**

Mutu No Beton [MPa]	Kapasitas Penampang Teoritis		Beban Maks Pengujian	Kapasitas Penampang Hasil Pengujian		Kapasitas Penampang Akibat Pemberian Gaya Prategang Sebesar 4 ton		Beban Maks Pengujian Setelah Diberi Gaya Prategang	Kapasitas Penampang Sesudah Pemberian Gaya Prategang		Pola Keruntuhan	
	$M_{lentur}$	$P_{geser}$	$P_{uji-1}$	$M_{lentur}$	$P_{geser}$	$M_{lentur}$	$P_{geser}$	$P_{uji-2}$	$M_{lentur}$	$P_{geser}$		
	[Nmm]	[kN]	[kN]	[Nmm]	[kN]	[Nmm]	[kN]	[kN]	[Nmm]	[kN]		
1	25,9	25.674.198,33	180,324	109,5	20.531.250	54,75	16.670.000	132,612	89,1	16.706.250	44,55	Lentur
2	27,62	27.139.396,3	182,402	116,9	21.918.750	58,45	16.670.000	116,708	89,6	16.800.000	44,8	Lentur
3	28,79	28.136.071,66	183,78	146,6	27.487.500	73,3	16.670.000	116,708	132	24.750.000	66	Geser
4	28,79	28.136.071,66	183,78	148,4	27.825.000	74,2	16.670.000	116,708	115,4	21.637.500	57,7	Lentur & geser

Variasi nilai pembebanan maksimum yang terjadi bisa dikarenakan oleh beberapa sebab, yakni; Variasi mutu bahan (agregat) dari satu adukan dengan adukan berikutnya, Variasi cara pengadukan, Stabilitas pekerja

Hasil pengujian balok nomor 1 dengan mutu 25,9 MPa adalah:

1. mempunyai beban geser sebesar 109,5 kN jauh lebih kecil daripada kapasitas geser penampang sebesar 180,324 kN;
2. mempunyai beban lentur sebesar 20.531.250 kN yang nilainya lebih kecil tetapi lebih mendekati dengan kapasitas lentur penampang sebesar 25.674.198 kN sehingga pada saat pengujian tersebut balok mengalami runtuh lentur.

Balok nomor 1 yang telah diuji tersebut kemudian diperbaiki dengan memberikan gaya prategang sebesar 4 ton kemudian diuji kembali. Hasil pengujian kedua menunjukkan ternyata balok tersebut sudah tidak mampu menahan momen lentur aktual sebesar 16.706.250 Nmm sedangkan secara teoritis kapasitas penampang hanya mampu menahan momen sebesar 16.670.000 Nmm, sehingga balok mengalami runtuh lentur.

Dari 4 balok yang diuji hanya balok ke-3 yang mengalami pola runtuh berbeda pada saat pengujian kedua kalinya, dimana balok tersebut mengalami runtuh geser meskipun pada pengujian pertamanya tetap mengalami runtuh lentur. Hal ini terlihat jelas pada **Tabel 1** bahwa dengan kapasitas geser penampang sebesar 116,708 kN balok tidak kuat menahan gaya geser yang terjadi sebesar 132 kN, sehingga balok mengalami runtuh geser. Hal lain yang mempengaruhi menurunnya kapasitas geser penampang balok dalam menahan geser adalah tingginya retak pada panampang balok yang mengakibatkan berkurangnya nilai  $v_c$ , sehingga hanya tulangan sengkang yang memiliki andil dalam menahan gaya geser  $v_n$ .

Hasil pengujian menunjukkan nilai pembebanan maksimum pada perbaikan balok dengan metode *external prestress* tidak mencapai nilai pembebanan maksimum seperti pada pengujian pertama. Hal ini diduga terjadi karena keterbatasan pemberian gaya prategang yang hanya mengandalkan tenaga manusia.

Menurut hasil perhitungan angka pemberian gaya prategang yang cukup besar untuk melakukan perbaikan kembali seperti kondisi semula dan untuk mengatasi keterbatasan tenaga manusia, dapat dilakukan dengan memperpanjang lengan momen pada saat memberikan gaya prategang, sehingga hal ini dapat memperingan tenaga yang dikeluarkan dalam pelaksanaan pengujian. Nilai pembebanan maksimum setelah diberikan gaya prategang untuk perbaikan adalah sebagai berikut; 89,6 kN, 89,1 kN, 115,4 kN, 132 kN.

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut: perbaikan dengan metode *external prestress* ini cocok dijadikan opsi perbaikan struktur selama penampang balok yang akan diperbaiki masih mampu memikul gaya geser yang terjadi; proses perbaikan sampel terbatas oleh kemampuan memberikan gaya oleh penguji maka untuk mendapatkan hasil pengujian yang lebih baik lengan momen gaya prategang harus diperbesar.

## DAFTAR RUJUKAN

- Asroni , A. (2010). *Balok dan Pelat Beton Bertulang*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Mulyono, T. (2004). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: ANDI.
- Nordin, H. (2005). *Strengthening Structures with Externally Prestressed Tendons*, Technical Report. Sweden: Lulea University of Technology.  
SNI-03-2847-2002.  
[http://dts.usu.ac.id/files/2002-12%20SNI%2003-2847-2002%20\(Beton\).pdf](http://dts.usu.ac.id/files/2002-12%20SNI%2003-2847-2002%20(Beton).pdf)
- Raju, N. K. (1981). *Prestressed Concrete*. Jakarta: Erlangga.