

Contents list available at journal.uib.ac.id**Journal of Civil Engineering and Planning**Journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce>

Jurnal Penelitian

Comparative Study of Reinforced Concrete Beams in School Buildings Using Prestressed Concrete Beams

Studi Perbandingan Balok Beton Bertulang pada Gedung Sekolah dengan Menggunakan Balok Beton Prategang

Petrus Haryanto Wibowo¹, Dony²

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, FTSP, Universitas Internasional Batam

Email korespondensi: dony.1426@yahoo.com

INFO ARTIKEL	ABSTRAK
<p>Kata kunci :</p> <p>Konten Format artikel (3 - 5 kata)</p>	<p>Konstruksi bangunan di Indonesia pada umumnya menggunakan beton. Beton yang digunakan untuk struktur bangunan seperti balok umumnya menggunakan beton bertulang. Sangat jarang dilihat penggunaan beton prategang untuk struktur bangunan seperti balok terutama di kota Batam. Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisa perbandingan antara struktur balok dengan beton bertulang yang sudah terpasang (existing) dan beton prategang pada proyek sekolah Kaliban (Kaliban School). Tahapan dalam penelitian ini meliputi Perencanaan balok beton prategang dan analisa perbandingan. Perencanaan balok beton prategang dirancang mejadi balok beton prategang komposit dengan menggunakan metode pra-tarik (pre-tension) dengan sistem penegangan penuh (fully prestressed) serta dicor bersama pelat lantai dan ditumpu selama masa pengecoran. Analisa perbandingan yang dilakukan penulis dalam penelitian ini merupakan perbandingan material yang akan digunakan pada balok beton bertulang dan balok beton prategang. Hasil perencanaan struktur beton prategang mendapatkan dimensi balok sebesar 200×400 dengan jumlah tendon berdiameter 12,7 mm sebanyak 4 buah dipasang 125 mm dari bawah balok. Hasil analisa perbandingan harga material total antara balok beton prategang yang memiliki dimensi 200×400 dengan balok beton bertulang existing yang memiliki dimensi 200×500 yaitu balok beton prategang memiliki harga 24,28% lebih murah dibandingkan dengan balok beton bertulang.</p>
ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Keywords:</p> <p>Balok , Beton Prategang, Beton Bertulang, Pratarik</p>	<p><i>Building construction in Indonesia generally uses concrete. The concrete used for building structures, such as beams, generally utilizes reinforced concrete. It is very rare to see the use of prestressed concrete for building structures such as beams, especially in Batam City. This study aims to analyze the comparison between the beam structure with reinforced concrete that has been existing and prestressed concrete in the Kaliban School project. The stages in this research included prestressed concrete beam design and comparative analysis. The design of prestressed concrete beams was planned to be composite prestressed concrete blocks using the pre-tension method with a fully prestressed system, and was cast with the floor slabs and also supported during the casting period. Comparative analysis conducted by the researcher of this study was a comparison of the materials used in reinforced concrete beams and prestressed concrete beams. The results of the prestressed concrete structure design obtained a beam dimension of 200 × 400 with a diameter of 12.7 mm, in which 4 pieces were installed 125 mm below the beam. The results of the comparison analysis of the total material prices between prestressed concrete beams with dimensions of 200 × 400 and existing reinforced concrete beams with dimensions of 200 × 500 showed that prestressed concrete beams were 24.28% cheaper than reinforced concrete beams.</i></p>

1. Pendahuluan

Indonesia memiliki banyak ragam jenis konstruksi bangunan. Seperti bangunan untuk industri atau pabrik, perkantoran, gedung olahraga, toko, hotel rumah tinggal, gedung sekolah, rumah sakit dan banyak lagi. Seluruh bangunan tersebut pada dasarnya mempunyai komponen struktur utama yang terdiri dari balok, kolom, pelat dan pondasi. Sebab itu, faktor utama yang sangat diperhatikan adalah perencanaan strukturnya. Selain itu konstruksi bangunan umumnya menggunakan material beton bertulang untuk komponen struktur utamanya, terutama, pada struktur balok. Balok yang digunakan dapat berupa balok sederhana ataupun balok menerus.[1] Di Indonesia, penggunaan beton prategang sangat jarang terlihat, terutama pada bangunan sekolah. Secara umum material beton bertulang merupakan yang terbanyak dipakai dalam bangunan. Padahal, melihat kemajuan dunia sekarang, material beton prategang merupakan hal sangat umum. Kemajuan beton prategang sudah sangat maju.

Salah satu contoh pada proyek pembangunan sekolah di Batam yaitu Kaliban School yang dilakukan oleh PT Kaliban Bangun Prakarsa. Struktur balok bangunan dalam proyek tersebut dengan bentang yang panjang di rencanakan menggunakan beton bertulang, sehingga menghasilkan kebutuhan tulangan dan dimensi balok yang besar. Berdasarkan contoh proyek pembangunan Kaliban School ini, penulis memiliki rancangan untuk mendesain balok beton prategang dengan menggunakan metode pretension dan sistem penegangan penuh (fully prestressed) serta pada saat pengecoran struktur pelat lantai pada bangunan ditumpu secara penuh. Sehingga penulis dapat melihat perbandingan penggunaan balok dengan sistem beton prategang dan balok dengan sistem beton bertulang.

2. Tinjauan Pustaka

Beton memiliki sifat yang sangat kuat terhadap tekan, namun sangat mudah rusak atau patah terhadap beban tarik.[2] Baja tulangan memiliki sifat atau kekuatan yang mampu menahan beban tarik maupun beban tekan yang sama kuat. Baja tulangan memiliki harga yang tinggi atau mahal, sehingga baja tulangan direncanakan penggunaannya terhadap beban tarik dan dihindari penggunaan terhadap beban tekan. Beton dan baja tulangan dapat dipadukan menjadi satu kesatuan sehingga terjadi aksi komposit yang menghasilkan bahan baru yang kita kenal dengan beton bertulang. Beton bertulang dari hasil komposit ini memiliki sifat yang sama dengan bahan dasar penyusunnya yang mampu menahan beban tekan maupun beban tarik. Beban tekan yang bekerja ditahan oleh beton dan beban tarik yang bekerja ditahan oleh baja tulangan.

Beton prategang merupakan beton yang menghilangkan tegangan tarik akibat beban yang bekerja dengan batas tertentu dengan cara diberikan tegangan tekan internal.[5]

Perbedaan utama antara beton bertulang dan beton prategang yaitu:

1. Beton bertulang :

Beton bertulang memiliki cara kerja dengan mengkombinasikan baja tulangan dengan beton dimana baja tulangan bekerja menahan gaya tarik dan beton bekerja menahan gaya tekan. Dengan penempatan tulangan yang sesuai dengan kebutuhan maka beton bertulang dapat mampu menahan tegangan yang timbul akibat beban yang bekerja baik tegangan tekan maupun tegangan tarik.

2. Beton prategang :

Beton prategang memiliki cara kerja dengan mengkombinasikan beton dan baja prategang mutu tinggi secara aktif, sedangkan beton bertulang memiliki kombinasi atau campuran yang pasif. Cara aktif dilakukan dengan cara menarik tulangan baja yang kemudian ditahan oleh beton. Karena pada saat belum ada beban yang bekerja beton dalam kondisi tertekan, tegangan tarik yang terjadi setelah beban bekerja dapat dikurangi dengan gaya tekan pada saat awal.

2.1 Sistem Pemberian Prategang

Menurut Andri Budiadi (2008), secara umum pemberian gaya prategang dibedakan menjadi dua jenis yaitu pemberian gaya prategang dengan sistem pra-tarik (pemberian gaya dilakukan sebelum pengecoran) dan sistem pasca-tarik (pemberian gaya dilakukan setelah pengecoran). [2]

2.2 Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang merupakan adanya pengurangan nilai gaya prategang yang telah diberikan pada tendon akibat beberapa faktor sebagai berikut: [4]

Tabel 2.1 Kehilangan Gaya Prategang

No	Pratarik	No	Pascatarik
1	Perpendekan elastis beton	1	Tidak ada kehilangan akibat perpendekan elastis kalau semua kawat ditarik secara bersamaan. Kalau kawat-kawat ditarik secara berurutan, maka akan terdapat kehilangan prategang akibat perpendekan elastis beton.
2	Relaksasi tegangan pada baja	2	Ralaksasi tegangan pada baja
3	Penyusutan beton	3	Penyusutan beton
4	Rangkak beton	4	Rangkak beton
		5	Gesekan
		6	Tergelincirnya angkur

Sumber : buku *Beton Prategang*, N Krishna Raju

2.3 Tahapan Pembebanan pada Beton Prategang

Beton prategang terbagi dalam beberapa tahapan pembebanan. Setiap tahapan pembebanan harus di periksa kondisi serat yang mengalami tekan maupun tarik. Pada tahapan itu tentunya berlaku tegangan izin yang sesuai dengan kondisi tendon serta beton.[5]

Pada beton prategang terdapat dua tahapan pembebanan yaitu:

a. Tahap transfer

Pada metode pra-tarik setelah angkur dilepaskan dan gaya prategang ditransferkan ke beton maka tahap ini merupakan tahap transfer. Pada sistem pasca-tarik, tahap transfer terjadi pada saat beton telah cukup umur dan diberikan gaya prategang.

Beban yang terjadi pada saat transfer yaitu beban akibat berat sendiri dan belum terjadinya kehilangan gaya pada saat transfer ini.

b. Tahap *service*

Pada saat beton prategang digunakan pada komponen struktur, ini merupakan tahap layanan (*service*). Beban yang bekerja pada tahap ini merupakan beban yang bekerja pada penampang struktur seperti beban hidup, beban finishing, beban gempa, dan beban lainnya. Pada tahap ini kehilangan gaya prategang telah terjadi.

3. Metode Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah proyek konstruksi Kaliban *School* yang terletak di Belian, Batam. Fokus utama dalam penelitian ini adalah analisis dan desain stuktur balok beton prategang berbentuk persegi panjang yang kemudian dibandingkan dengan balok beton bertulang yang ada (*existing*).

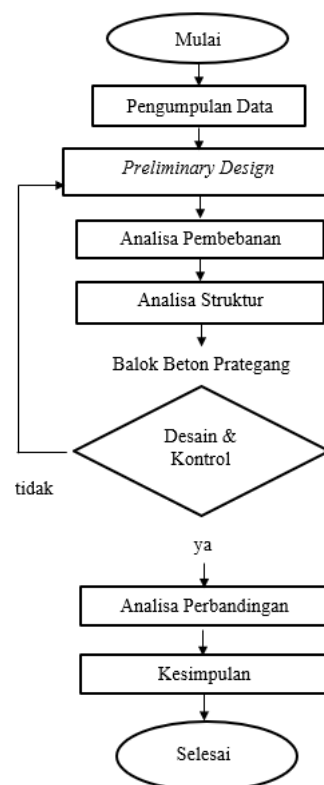
Data yang dipakai dalam penelitian ini yaitu:

1. Fungsi bangunan gedung sekolah
2. Jumlah lantai 5 lantai
3. Panjang balok 6m
4. Mutu beton K300 (25 MPa)
5. Mutu tulangan 240 – 390 MPa
6. Mutu tulangan baja prategang 1860 MPa
7. Posisi tendon dari bawah 125 mm
8. Modulus elastisitas baja 200000 MPa
9. Modulus elastisitas beton 23500 MPa

Analisa pembebanan pada struktur balok menggunakan peraturan SNI 1727 tahun 2013 dan PPIUG tahun 1983. Analisa struktur dan desain balok beton prategang berdasarkan peraturan SNI 2847 tahun 2013 dan buku Desain Praktis Beton Prategang karya Andri Budiadi. Perhitungan momen, gaya geser pada struktur menggunakan bantuan program *ETABS* dan perhitungan manual.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini memiliki alur penelitain sebagai berikut:



Gambar 4.1 Diagram Alir Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

Balok prategang yang akan dirancang adalah balok prategang dengan sistem pratarik serta sistem penegangan *fully prestressed* dan dicor setempat dengan pelat lantai sehingga menghasilkan balok komposit.

4.1 Preliminary Design

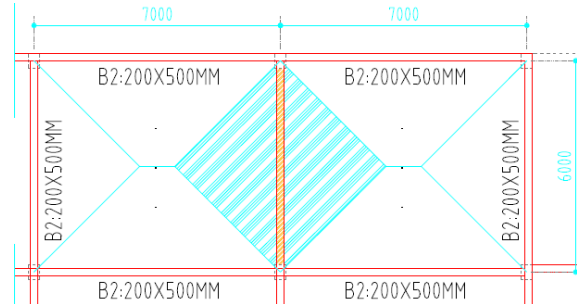
Data yang digunakan untuk merancang struktur balok yaitu:

- Berat jenis beton 24 kN/m³
- Jenis tulangan prategang *seven wired strand*

- Diameter tulangan prategag 12,7 mm
- Luas tulangan prategag 100 mm²
- Dimensi balok beton bertulang 200x500 mm
- Dimensi balok beton prategag 200x400 mm

4.2 Analisa Pembebanan pada Struktur Balok

Pembebanan pada struktur balok terdiri dari beban mati dan beban hidup.



Gambar 4.1 Distribusi Beban pada Balok B2

Sumber: Gambar Struktur Proyek Kaliban School

4.3 Analisa Beban Mati

Beban akibat Berat Sendiri Balok (qd)	: $0.2 \times 0.4 \times 24$	= 1.92 kN/m
Berat pelat lantai	: $0.12 \times 6 \times 24$	= 17.28 kN/m
Berat Keramik t = 1 cm	: $1 \times 6 \times 0.24$	= 1.44 kN/m
Berat Spesi t = 2 cm	: $2 \times 6 \times 0.21$	= 2.52 kN/m
Berat Plafond	: 6×0.18	= 1.08 kN/m
Berat ME	: 6×0.2	= 1.2 kN/m
Total Beban Tambahan (qp)	: 23.52 kN/m	

4.4 Analisa Beban Hidup

Beban Hidup (qL) : $1.92 \times 6 = 11.52$ kN/m

4.5 Analisa Momen

Momen akibat berat sendiri (Md)	: $1/8 \times 1.92 \times 62$	= 8.64 kN.m
Momen akibat beban tambahan (Mp)	: $1/12 \times 23.52 \times 62$	= 70.56 kN.m
Momen akibat beban hidup (ML)	: $1/12 \times 11.52 \times 62$	= 34.56 kN.m

4.6 Kombinasi

$$1.2 Md + 1.2 Mp + 1.6 ML = 10.368 + 84.67 + 55.30 = 150.34 \text{ kN.m}$$

4.7 Data Penampang Balok dan Pelat Lantai

- Tinggi Balok (h)	: 400 mm
- Lebar Balok (b)	: 200 mm
- Tebal Pelat (t _p)	: 120 mm
- Luas Balok (A)	: 80000 mm ²
- Panjang Balok (L)	: 6000 mm
- Jarak antar balok (L _{trave})	: 7000 mm
- Jarak dari titik pusat ke atas (y _t)	: 200 mm
- Jarak dari titik pusat ke bawah (y _b)	: 200 mm
- Momen tahan serat atas (w _t)	: 5333333,33 mm ³
- Momen tahan serat bawah (w _b)	: 5333333,33 mm ³
- Inersia penampang (I)	: 106666666,67 mm ⁴

4.8 Lebar Efektif Pelat Lantai

Perhitungan lebar efektif pelat lantai diambil nilai terkecil dari perhitungan dibawah ini:

- $Be = 0.25 \times L = 1500 \text{ mm}$
 - $Be = (16 \times t_p) + b = 2120 \text{ mm}$
 - $Be = L_{trave} = 7000 \text{ mm}$
- Jadi dipilih nilai $Be = 1500 \text{ mm}$

4.9 Data Penampang Komposit

- Luas penampang komposit (A_c) : 260000 mm²
- Jarak dari titik pusat ke atas (y'_t) : 140 mm
- Jarak dari titik pusat ke bawah (y'_b) : 380 mm
- Inersia penampang komposit (I) : 5026666666,67 mm⁴
- Momen tahan serat atas (w'_t) : 35904761,9 mm³
- Momen tahan serat bawah (w'_b) : 12338070,2 mm³

4.10 Data Penampang Komposit

- Total kehilangan prategang (η) = 100% - 25% = 75% = 0.75
- Gaya prategang saat transfer P_i :

$$P_i = \frac{P_e}{\eta}$$

- Nilai eksentrisitas (e) = 75 mm
- Tegangan tarik total serat atas balok saat transfer (f_t)

$$f_t = -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \times e}{w_t} - \frac{1,4M_d}{w_t} < \sigma_{tt} = 0$$

$$0 = -\frac{P_i}{80000} + \frac{P_i \times 75}{5333333,3} - \frac{12,096 \times 10^6}{5333333,3}$$

$$P_i = 1451520 \text{ N}$$

- Tegangan tekan total serat bawah balok saat transfer (f_b)

$$f_b = -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \times e}{w_b} + \frac{1,4M_d}{w_b} < \sigma_{ct} = 0.6f_c'$$

$$f_b = -\frac{P_i}{80000} - \frac{P_i \times 75}{5333333,3} + \frac{12,096 \times 10^6}{5333333,3} < \sigma_{ct} = 15$$

$$15 = -\frac{P_i}{80000} - \frac{P_i \times 75}{5333333,3} + \frac{12,096 \times 10^6}{5333333,3}$$

$$P_i = 650089,412 \text{ N}$$

- Tegangan tekan total serat atas balok pada saat servis (f'_t)

$$f'_t = -\frac{P_e}{A \times \eta} + \frac{P_e \times e}{w_t \times \eta} - \frac{1,2M_d}{w_t} - \frac{1,2M_p \times (y'_t - t_p)}{I_c} - \frac{1,6M_L \times (y'_t - t_p)}{I_c} < \sigma_{cs} = 15$$

$$15 = -\frac{P_e}{80000 \times 0,75} + \frac{P_e \times 125}{5333333,3 \times 0,75} - \frac{10.368 \times 10^6}{5333333,3} - \frac{84,67 \times 10^6 \times 20}{5026666666,67} - \frac{55.3 \times 10^6 \times 20}{5026666666,67}$$

$$P_i = 14934102,92 \text{ N}$$

- Tegangan tarik total serat bawah balok pada saat servis (f'_b)

$$f'_b = -\frac{P_e}{A \times \eta} - \frac{P_e \times e}{w_b \times \eta} + \frac{1,2M_d}{w_b} + \frac{1,2M_p}{w'_b} + \frac{1,6M_L}{w'_b} < \sigma_{ts} = 0$$

$$0 = -\frac{P_e}{80000 \times 0,75} - \frac{P_e \times 125}{5333333,3 \times 0,75} + \frac{10.368 \times 10^6}{5333333,3} + \frac{84,67 \times 10^6}{13228070,18} + \frac{55.3 \times 10^6}{13228070,18}$$

$$P_i = 628712,67 \text{ N}$$

Dipilih nilai P_i terkecil yaitu 628712,67 N

4.11 Perhitungan Jumlah Tulangan/Kabel Prategang

- Gaya prategang awal $P_i = 628712,67$ N
- Nilai tegangan leleh (f_{py}):
 $f_{py} = 0,85 \times f_{pu} = 1581$ MPa
- Luas tulangan yang diperlukan ($A_{p-perlu}$):
$$A_{p-perlu} = \frac{P_i}{f_{py}} = \frac{628712,67}{1581} = 397,67 \text{ mm}^2$$
- Luas tulangan tunggal ($A_{p-tunggal}$):
 $A_{p-tunggal} = 100 \text{ mm}^2$
- Banyak kabel yang diperlukan (n_p):
$$n_p = \frac{A_{p-perlu}}{A_{p-tunggal}} = \frac{397,67}{100} = 3,9767 \approx 4 \text{ buah}$$
- Gaya prategang awal maksimum (P_{i-maks}):
 $P_{i-maks} = f_{py} \times A_{p-terpasang} = 1581 \times 4 \times 100 = 632400$ N

4.12 Kontrol Tegangan

- Gaya prategang awal (P_i): 632400 N
- Gaya prategang efektif (P_e):
 $P_e = \eta \times P_i = 0,75 \times 632400 = 474300$ N
- Tegangan tarik pada serat atas balok saat transfer
$$f_t = -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \times e}{w_t} - \frac{1,4M_d}{w_t} < \sigma_{tt} = 0$$

 $f_t = -7,91 + 8,89 - 2,27 < \sigma_{tt} = 0$
 $f_t = -1,28 < \sigma_{tt} = 0$
- Tegangan tekan pada serat bawah bawah saat transfer
$$f_b = -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \times e}{w_b} + \frac{1,4M_d}{w_b} < \sigma_{ct} = 0,6f_c'$$

 $f_b = -7,91 - 8,89 + 2,27 < \sigma_{ct} = 15$
 $f_b = -14,53 < \sigma_{ct} = 15$
- Tegangan tekan pada serat atas balok saat servis
$$f_t = -\frac{P_e}{A} + \frac{P_e \times e}{w_t} - \frac{1,2M_d}{w_t} - \frac{1,2M_p \times (y'_t - t_p)}{I_c} - \frac{1,6M_L \times (y'_t - t_p)}{I_c} < \sigma_{cs} = 15$$

 $f_t = -5,93 + 6,68 - 1,94 - 0,34 - 0,22 < \sigma_{cs} = 15$
 $f_t = -1,57 < \sigma_{cs} = 15$
- Tegangan tarik pada serat bawah balok saat servis
$$f_t = -\frac{P_e}{A \times \eta} - \frac{P_e \times e}{w_b \times \eta} + \frac{1,2M_d}{w_b} + \frac{1,2M_p}{w'_b} + \frac{1,6M_L}{w'_b} < \sigma_{ts} = 0$$

 $f_t = -5,93 - 6,68 + 1,94 + 6,40 + 4,18 < \sigma_{ts} = 0$
 $f_t = -0,26 < \sigma_{ts} = 0$
- Tegangan tekan pada serat atas pelat saat servis
$$f_t = -\frac{1,2M_p}{w'_t} - \frac{1,6M_L}{w'_t} < \sigma_{cs} = 15$$

$$f_t = -2,36 - 1,54 < \sigma_{cs} = 15$$

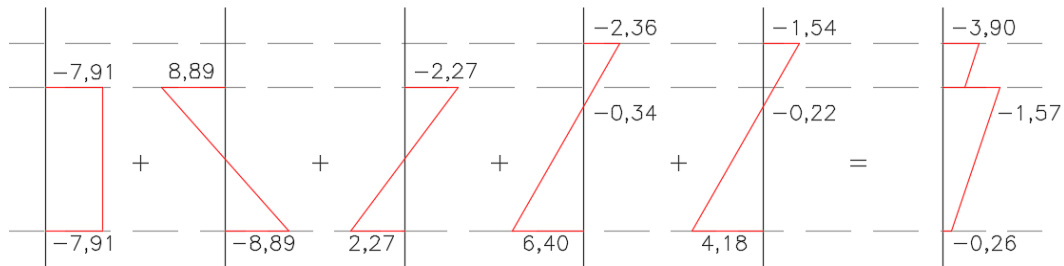
$$f_t = -3,90 < \sigma_{cs} = 15$$

- Tegangan tekan pada serat bawah pelat saat servis

$$f_t = -\frac{1,2M_p \times (y'_t - t_p)}{I_c} - \frac{1,6M_L \times (y'_t - t_p)}{I_c} < \sigma_{cs} = 15$$

$$f_t = -0,34 - 0,22 < \sigma_{cs} = 15$$

$$f_t = -0,56 < \sigma_{cs} = 15$$



Gambar 4.2 Diagram Tegangan

Sumber: Gambar Autocad

4.13 Kontrol Kapasitas Penampang

- Nilai tegangan leleh (f_{py}) :

$$f_{py} = 0,85 f_{pu}, \text{ sehingga } \gamma_p = 0,4$$

- Mutu beton (f'_c) :

$$f'_c = 25 \text{ MPa}$$

- $\beta_1 = 0,85$

- Rasio penulangan pratekan (ρ_p) :

$$\rho_p = \frac{A_{p\text{-terpasang}}}{B_e \times d_p} = \frac{400}{1500 \times 395} = 0,000675$$

Karena tulangan non prategang tidak di perhitungkan untuk menahan beban yang bekerja maka, $w = 0$ dan $w' = 0$

- Tegangan yang bekerja pada tendon saat penampang mencapai kuat nominalnya (f_{ps}):

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left\{ \rho_p \frac{f_{pu}}{f'_c} \right\} \right] = 1860 \left[1 - \frac{0,4}{0,85} \left\{ 0,000675 \frac{1860}{25} \right\} \right] = 1816,04 \text{ MPa}$$

- Tinggi blok tegangan tekan (a):

$$a = \frac{A_{p\text{-terpasang}} \times f_{ps}}{0,85 \times f'_c \times B_e} = \frac{400 \times 1816,04}{0,85 \times 25 \times 1500} = 22,79 \text{ mm} < t = 120 \text{ mm}$$

- Momen nominal yang dapat dipikul oleh penampang (Mn):

$$M_n = A_{p\text{-terpasang}} \times f_{ps} \left(d_p - \frac{a}{2} \right) = 400 \times 1816,04 \times \left(395 - \frac{22,79}{2} \right)$$

$$M_n = 278565367,07 \text{ N.mm}$$

- Momen maksimum yang dapat dipikul oleh penampang (Mu):

$$M_u = \phi M_n = 0,8 \times 278565367,07 = 222925093,66 \text{ N.mm}$$

- Momen aktual yang harus dipikul oleh penampang (M_{aktual}):

$$M_{aktual} = 1,2M_d + 1,2M_p + 1,6M_L = 150336000 \text{ N.mm} < M_u \text{ (aman)}$$

4.14 Perhitungan Tulangan Geser

a. Geser Web

- Tegangan leleh tulangan geser (f_y) : 240 MPa
- Tinggi efektif penampang (d) : 362 mm
- Gaya geser maksimum (V_u): 76,896 kN
- Momen maksimum (M_u) : 150,336 kN.m
- Kuat geser beton (V_c) :

$$V_c = \left(\frac{\sqrt{f'_c}}{20} + \frac{5 \times V_u \times d}{M_u} \right) \times b \times d = \left(\frac{\sqrt{25}}{20} + \frac{5 \times 76,896 \times 10^3 \times 362}{150,336 \times 10^6} \right) \times 200 \times 362$$

$$V_c = 85128,253 \text{ N}$$

- Kuat geser beton minimum ($V_{c \text{ min}}$) :

$$V_{c \text{ min}} = \frac{\sqrt{f'_c} \times b \times d}{6} = \frac{\sqrt{25} \times 200 \times 362}{6} = 60333,33 \text{ N}$$

- Kuat geser beton maksimum ($V_{c \text{ maks}}$):

$$V_{c \text{ maks}} = 0,4 \times \sqrt{f'_c} \times b \times d = 0,4 \times \sqrt{25} \times 200 \times 362 = 144800 \text{ N}$$

- Kuat geser sengkang (V_s):

Dipilih nilai $V_c = 85128,253 \text{ N}$

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c = \frac{76,896 \times 10^3}{0,75} - 85128,253 = 17399,747 \text{ N}$$

- Luas tulangan sengkang terpasang dengan besi D8 (A):

$$A_v = \frac{\pi \times D^2 \times 2}{4} = \frac{\pi \times 8^2 \times 2}{4} = 100,53 \text{ mm}^2$$

- Jarak sengkang (s):

$$s = \frac{A_v \times f_y \times d}{V_s} = \frac{100,53 \times 240 \times 362}{17399,747} = 501,964 \text{ mm}$$

$$s = 0,75 \times h = 0,75 \times 400 = 300 \text{ mm}$$

$$s = 600 \text{ mm}$$

dipilih nilai s terkecil = 300 mm

dipakai nilai s = 300 mm

- Luas tulangan geser minimum ($A_{v \text{ min}}$):

$$A_v = \frac{75 \times \sqrt{f'_c} \times b \times s}{1200 \times f_y} = \frac{75 \times \sqrt{25} \times 200 \times 300}{1200 \times 240} = 78,125 \text{ mm}^2$$

$$A_v = \frac{b \times s}{3 \times f_y} = \frac{200 \times 300}{3 \times 240} = 83,33 \text{ mm}^2$$

Jadi luas tulangan geser minimum $A_v = 78,125 <$ luas tulangan geser terpasang di daerah tumpuan $\phi 8 - 300$ ($A = 100,53 \text{ mm}^2$)

b. Geser Lentur

- Tegangan leleh tulangan geser (f_y) : 240 MPa
- Tinggi efektif penampang (d) : 362 mm
- Gaya geser maksimum lapangan (V_u): 55,944 kN
- Momen maksimum (M_u) : 150,336 kN.m
- Momen akibat berat sendiri (M_d):

$$M_d = \frac{bs \times L \times L \times 0,25}{2} - \frac{bs \times (L \times 0,25)^2}{2} = \frac{2.304 \times 6 \times 6 \times 0,25}{2} - \frac{2.304 \times (6 \times 0,25)^2}{2}$$

$$M_d = 7,776 \text{ kN.m}$$

- Tegangan akibat gaya prategang efektif (f_{pe}):

$$f_{pe} = \frac{P_e}{A} + \frac{P_e \times e}{w} = \frac{474300}{80000} + \frac{474300 \times 75}{5333333,33} = 16,8 \text{ MPa}$$

- Tegangan akibat berat sendiri (f_d):

$$f_d = \frac{M_d}{W} = \frac{7,776 \times 10^6}{5333333,33} = 1,458 \text{ MPa}$$

- Gaya geser akibat beban mati (V_d):

$$V_d = bs \times L - bs \times 0,25 \times L = 2.304 \times 6 - 2,304 \times 1,5 = 3,456 \text{ kN}$$

- Momen retak (M_{cr}):

$$M_{cr} = \frac{I}{y_t} \left(\frac{\sqrt{f_c'}}{2} + f_{pe} - f_d \right) = \frac{1066666666,67}{200} \left(\frac{\sqrt{25}}{2} + 16,8 - 1,458 \right) \times 10^{-6}$$

$$M_{cr} = 95,15733333 \text{ kN.m}$$

- Kuat geser lentur (V_{ci}):

$$\frac{M_{maks}}{V_i} = \frac{(L \times L \times 0,25) - (0,25L)^2}{L - (0,5L)} = \frac{(6 \times 6 \times 0,25) - (0,25 \times 6)^2}{6 - 3} = 3,375$$

$$\frac{V_i}{M_{maks}} = \frac{1}{3,375} = 0,296$$

$$V_{ci} = 0,05 \times b \times d \times \sqrt{f_c'} + V_d + \frac{V_i}{M_{maks}} \times M_{cr}$$

$$V_{ci} = (0,05 \times 200 \times 362 \times 10^{-3}) + 3,456 + (0,296 \times 95,15733333) = 35,24 \text{ kN}$$

- Kuat geser lentur minimum ($V_{ci \text{ min}}$):

$$V_{ci \text{ min}} = \frac{b \times d \times \sqrt{f_c'}}{7} = \frac{200 \times 362 \times \sqrt{25}}{7} = 51714,286 \text{ N} = 51,714 \text{ kN}$$

$$\text{Karena nilai } V_{ci} < V_{ci \text{ min}} \text{ maka nilai } V_{ci} = 51,714 \text{ kN}$$

- Kuat geser sengkang (V_s):

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_{ci} = \frac{55,944 \times 10^3}{0,75} - 51714,286 = 22877,714 \text{ N}$$

- Luas tulangan sengkang terpasang dengan besi D8 (A):

$$A_v = \frac{\pi \times D^2 \times 2}{4} = \frac{\pi \times 8^2 \times 2}{4} = 100,53 \text{ mm}^2$$

- Jarak sengkang (s):

$$s = \frac{A_v \times f_y \times d}{V_s} = \frac{100,53 \times 240 \times 362}{22877,714} = 381,77 \text{ mm}$$

$$s = 0,75 \times h = 0,75 \times 400 = 300 \text{ mm}$$

$$s = 600 \text{ mm}$$

dipilih nilai s terkecil = 300 mm

dipakai nilai s = 300 mm

- Luas tulangan geser minimum ($A_{v \text{ min}}$):

$$A_v = \frac{75 \times \sqrt{f_c'} \times b \times s}{1200 \times f_y} = \frac{75 \times \sqrt{25} \times 200 \times 300}{1200 \times 240} = 78,125 \text{ mm}^2$$

$$A_v = \frac{b \times s}{3 \times f_y} = \frac{200 \times 300}{3 \times 240} = 83,33 \text{ mm}^2$$

Jadi luas tulangan geser minimum $A_v = 78,125 <$ luas tulangan geser terpasang di daerah lapangan $\emptyset 8 - 300$ ($A = 100,53 \text{ mm}^2$)

- c. Geser horizontal di daerah tumpuan
- Tegangan leleh tulangan geser (f_y) : 240 MPa
 - Tinggi efektif penampang (d) : 482 mm
 - Gaya geser maksimum (V_u): 76,896 kN
 - Tegangan geser horizontal (τ):

$$\tau = \frac{V_u}{\phi \times b \times d} = \frac{76,896 \times 10^3}{0.75 \times 200 \times 482} = 1,064$$

- Untuk *shear connector* dipasang besi D8 (A):

$$A_s = \frac{\pi \times D^2 \times 2}{4} = \frac{\pi \times 8^2 \times 2}{4} = 100,53 \text{ mm}^2$$

- Jarak *shear connector* yang diperlukan (s):

$$s = \frac{f_y \times A_s}{b \times \tau} = \frac{240 \times 100,53}{200 \times 1,064} = 94,52 \text{ mm}$$

Jadi digunakan *shear connector*: 2D8 - 90

- d. Geser horizontal di daerah lapangan
- Tegangan leleh tulangan geser (f_y) : 240 MPa
 - Tinggi efektif penampang (d) : 482 mm
 - Gaya geser maksimum (V_u): 55,944 kN
 - Tegangan geser horizontal (τ):

$$\tau = \frac{V_u}{\phi \times b \times d} = \frac{55,944 \times 10^3}{0.75 \times 200 \times 482} = 0,774$$

- Untuk *shear connector* dipasang besi D8 (A):

$$A_s = \frac{\pi \times D^2 \times 2}{4} = \frac{\pi \times 8^2 \times 2}{4} = 100,53 \text{ mm}^2$$

- Jarak *shear connector* yang diperlukan (s):

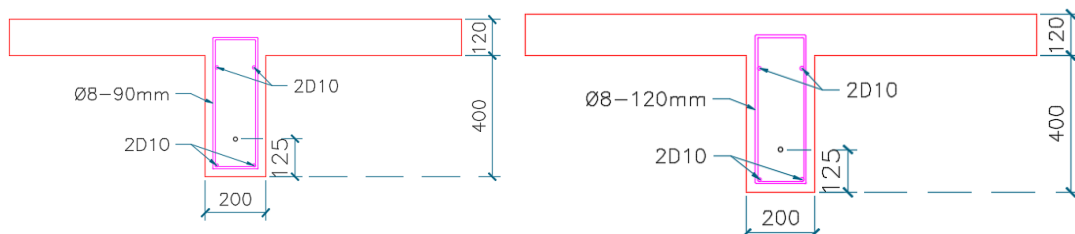
$$s = \frac{f_y \times A_s}{b \times \tau} = \frac{240 \times 100,53}{200 \times 0,774} = 129,92 \text{ mm}$$

Jadi digunakan *shear connector*: 2D8 - 120

Tulangan sengkang di daerah tumpuan : 2D8 - 90

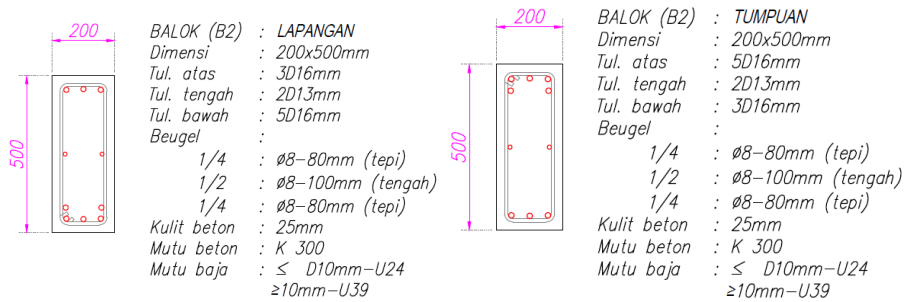
Tulangan sengkang di daerah lapangan : 2D8 - 120

4.15 Hasil Perancangan Balok Beton Prategang



Gambar 4.3 Detail Balok Prategang B2

Sumber: Gambar Autocad



Gambar 4.4 Detail Balok Bertulang B2

Sumber:Gambar Autocad

4.16 Analisa Perbandingan Beton Bertulang dan Beton Prategang

Perbandingan yang ditinjau dari balok beton bertulang dengan balok beton prategang adalah perbandingan harga material yang digunakan. Analisa perbandingan di tampilan pada tabel dibawah ini.

Tabel 4.1 Perbandingan Harga Material antara Beton Bertulang dan Beton Prategang

No	Deskripsi	Volume	Harga satuan Rp	Total Harga Rp
Beton Bertulang				
1	Tulangan Longitudinal D16 (Kg)	75,76	7.400	560.624
2	Tulangan Longitudinal D13 (Kg)	12,503	7.400	92.522
3	Tulangan Sengkang D8 (Kg)	20,52	7.800	160.056
4	Beton K-300 (m3)	0,6	980.000	588.000
Total				1.401.202
Beton Prategang				
1	Tulangan Longitudinal D16 (Kg)	37,88	7.400	280.312
2	Tulangan Sengkang D8 (Kg)	18,04	7.800	140.712
3	Beton K-300 (m3)	0,48	980.000	470.400
4	Tulangan Tendon (Kg)	18,84	9.000	169.500
Total				1.060.984

Sumber : Data Analisa

Analisa perbandingan harga total material antara balok beton prategang dengan balok beton bertulang :

$$\% \text{harga} = \frac{\text{total harga beton bertulang} - \text{total harga beton prategang}}{\text{total harga beton bertulang}}$$

$$\% \text{harga} = \frac{1401202 - 1060984}{1401202} = 24,28\%$$

Analisa perbandingan kebutuhan tulangan longitudinal (T_M) antara balok beton prategang dengan balok beton bertulang :

$$\% T_M = \frac{\text{volume tulangan beton bertulang} - \text{volume tulangan beton prategang}}{\text{volume tulangan beton bertulang}}$$

$$\% T_M = \frac{(75,76 + 12,503) - (37,88 + 18,84)}{(75,76 + 12,503)} = 35,74\%$$

Analisa perbandingan kebutuhan tulangan sengkang (T_v) antara balok beton prategang dengan balok beton bertulang :

$$\%T_v = \frac{\text{volume tulangan beton bertulang}-\text{volume tulangan beton prategang}}{\text{volume tulangan beton bertulang}}$$

$$\%T_M = \frac{20,52-18,04}{20,52} = 12,09\%$$

Analisa perbandingan kebutuhan beton antara balok beton prategang dengan balok beton bertulang :

$$\%\text{beton} = \frac{\text{volume beton bertulang}-\text{volume beton prategang}}{\text{volume beton bertulang}}$$

$$\%\text{beton} = \frac{0,6-0,48}{0,6} = 20\%$$

Analisa perbandingan luas penampang antara balok beton prategang dengan balok beton bertulang :

$$\%\text{luas} = \frac{\text{luas beton bertulang}-\text{luas beton prategang}}{\text{luas beton bertulang}}$$

$$\%\text{luas} = \frac{(200 \times 500) - (200 \times 400)}{(200 \times 500)} = 20\%$$

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan analisa dari penelitian ini ditarik kesimpulan yaitu:

1. Dimensi balok beton prategang yang digunakan untuk balok B2 dengan panjang 6m yaitu berukuran 200×400 dimana balok beton prategang memiliki penampang 20% lebih kecil dibandingkan dengan balok beton bertulang dengan ukuran 200×500
2. Tulangan longitudinal yang digunakan pada balok B2 beton prategang sebanyak 4D10 dan jumlah tendon sebanyak 4 tendon dengan luas sebesar 400mm^2 yang terletak dengan jarak 125 mm dari bawah balok serta memiliki tulangan sengkang daerah tumpuan D8-90 dan tulangan sengkang daerah lapangan D8-120.
3. Dari hasil analisa secara keseluruhan balok B2 beton prategang memiliki harga 24,28% lebih murah dibandingkan dengan balok B2 beton bertulang.

5.2 Saran

Untuk penelitian lebih lanjut, penulis memiliki saran sebagai berikut:

1. Perhitungan balok beton prategang kedepannya dapat dilakukan dengan metode pasca tarik (*post tension*) dan menggunakan sistem penegangan sebagian (*partial prestressed*).
2. Analisa lebih lanjut dapat dilakukan analisa terhadap waktu pengerjaan antara balok beton bertulang dengan balok beton prategang.
3. Tidak harus menggunakan bentuk penampang persegi, untuk penelitian selanjutnya balok beton prategang dapat didesain atau dirancang dengan bentuk I, T, atau T terbalik.

Daftar Pustaka

- [1] Kojongian, A. M., Dapas, S. O., & Wallah, S. E. (2018a). Desain Struktur Balok Beton Prategang Untuk Bangunan Industri. *JURNAL SIPIL STATIK*.
- [2] Asroni, A. (2017). Teori dan Desain Balok Plat Beton Bertulang. In *Surakarta: Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Surakarta*.
- [3] Budiadi, A. (2008). *Desain Praktis Beton Prategang*. Yogyakarta: Andri.2008.
- [4] Raju, N. Krishna (1988). *Beton Prategang*. Edisi II, Erlangga 1988.
- [5] Soetoyo, Ir. (2002). *Konstruksi Beton Pratekan*. Surabaya, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Institut Teknologi Sepuluh November.