

Analisis Beton Prategang Menggunakan Variasi Bentuk Penampang *Prestress Concrete I Girder*

Analysis of Prestress Concrete with The Variation of I-Girder

Arief Hidayat, Hakas Prayuda, Taufiq Ilham Maulana

Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta

Abstrak. Jembatan merupakan infrastruktur yang dibangun untuk akses mobilisasi dalam melewati hadangan seperti lembah, sungai, laut, maupun melewati jalan yang padat dengan membangun *flyover*. Salah satu elemen utama dari jembatan adalah *Girder* atau gelagar. Bentuk penampang girder akan mempengaruhi kekuatan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk mencari bentuk penampang efektif dari *Prestress Concrete I Girder* (PCI) yang akan digunakan pada bagian struktur atas jembatan. Tiga bentuk penampang PCI *Girder* dengan bentang 40 m dianalisis dengan salah satu penampangnya telah dimodifikasi. Hasil dari analisa *loss of prestress*, tegangan, dan lendutan yang terjadi pada setiap penampang menunjukkan bahwa penampang tipe 1 adalah penampang yang paling efektif.

Kata kunci: Jembatan, Balok Prategang, Gelagar, PCI *Girder*

Abstract. The Bridge is an infrastructure built for access to pass the obstacles such as valley, river, sea, as well as crowded highway which needs flyover bridge. One of the main structure element in the bridge is girder. the cross-section's shape of girder will affect structure strength. This research aims to find the best shape of girder's cross-section that will be used for bridge. Three different sections were analyzed with span length of 40 m. moreover, one of three sections has modified to provide variety. The result of analysis on loss of prestress, stress, and deflection occurred indicates that the type 1 is the most effective shape of PCI *Girder*.

Keywords: Bridges, Prestress, Girder, PCI *Girder*

1. Pendahuluan

Jembatan merupakan infrastruktur yang dibangun untuk akses mobilisasi dalam melewati hadangan seperti lembah, sungai, laut, maupun melewati jalan yang padat lalu lintas dengan membangun *flyover*. *Girder* atau gelagar pada struktur atas jembatan merupakan salah satu bagian terpenting dalam konstruksi jembatan. *Girder* pada jembatan memiliki beberapa jenis, seperti *Box Girder*, *Prestress Concrete I Girder* (*PC Girder*), *U-Girder* dan *T-Girder*. *Girder* dengan jenis *Prestress Concrete I* biasanya digunakan dalam pembuatan jembatan dengan bentang maksimal sampai 50 m. Dalam perancangan pembuatan *girder* jembatan, perlu adanya analisis yang

berguna untuk menentukan bahwa girder yang akan digunakan pada struktur atas jembatan sudah mampu menahan gaya-gaya atau beban yang akan terjadi pada jembatan tersebut

Beberapa penelitian mengenai beton prategang sudah banyak diteliti, diantaranya adalah penelitian tentang perencanaan struktur jembatan prategang yang telah diteliti oleh (Santosa dkk., 2015) dengan hasil spesifikasi jembatan rencana yang akan digunakan pada perencanaan jembatan Suru. Wicaksono dkk., (2016) meneliti tentang perencanaan struktur jembatan *slab on pile* Sungai Brantas dengan hasil menggunakan tebal rencana *full slab* 350 mm, menggunakan 14 *strand* diameter 12,7 mm dengan tambahan tulangan untuk menahan

momen positif dan negatif. Hardwiyono dkk., (2014) meneliti tentang perancangan ulang jembatan Gajah Wong dengan *box girder* dengan hasil tegangan yang terjadi pada *box girder* pada serat atas $f' = 12,597$ MPa dan tegangan serat bawah $f_b = -2,527$ MPa. Meidiansyah dkk., (2016) meneliti tentang analisis *box girder flyover* Rawabuaya dengan hasil jembatan dapat menahan 90% bebena gempa ultimit dan tidak perlu adanya tambahan tulangan pada *box girder* untuk menambah kekuatan tekan dan Tarik beton. Putra dkk., (2017) meneliti tentang perbandingan penggunaan *PCU Girder* dan *PCI Girder* pada struktur jembatan Jurang Gempal dengan hasil bahwa penggunaan *PCU Girder* lebih mahal dibandingkan *PCI Girder* dikarenakan penggunaan tendon, luasan penampang, dan banyaknya *girder* yang digunakan lebih besar. Nurrianto dkk., (2013) meneliti tentang perhitungan perancangan jalan layang akses terminal A Mangkang Semarang dengan hasil, struktur atas jembatan menggunakan *PCI Girder* dengan bentang 52 m dengan Panjang persegmen 6 m. Penelitian tentang tegangan dan lendutan yang terjadi pada struktur jembatan prategang oleh (Wakid dkk, 2014) meneliti tentang perkuatan struktur atas jembatan komposit dengan metode prategang eksternal dengan hasil kapasitas *existing* penampang komposit yang terjadi pada lantai beton dengan tegangan sebesar $230,02 \text{ kg/cm}^2 >$ tegangan ijin $135,00 \text{ kg/cm}^2$, tegangan lentur = $3.538,14 \text{ kg/cm}^2 >$ tegangan lentur ijin = $1.392,0 \text{ kg/cm}^2$, tegangan geser = $5.006,53 \text{ kg/cm}^2 >$ tegangan geser ijin $392,0 \text{ kg/cm}^2$ dan lendutan = $8,09 \text{ cm} >$ lendutan ijin 4 cm . (Leo dan Agung, 2017) meneliti tentang efisiensi *Blub-tee shape and Half slab girder (BH Girder)* dengan blister tunggal terhadap *PCI Girder* dengan hasil sistem *BH Girder* dengan blister tunggal lebih efisien dari segi tegangan dan volume *strands*, walaupun volume betonnya lebih besar 6,6% dari sistem *I Girder*. Hady dkk., (2017) meninjau ulang *two cell box girder* beton prategang pada perencanaan pembangunan *flyover* di kota Banda Aceh dengan hasil nilai lendutan akibat kombinasi pembebanan pada *box*

girder adalah $0,0091 \text{ m} < L/250$, dan rasio kapasitas geser kondisi ultimit masih memenuhi persyaratan $V_u/\phi V_n < 1$ disepanjang bentang balok. Setyawan dan Sulistyono, (2012) meneliti tentang analisis struktur jembatan beton prategang dengan metode *balanced cantilever* dengan menggunakan program SAP2000 yang dibandingkan dengan program ATENA, dengan hasil lendutan pada pada 1/3 bentang pada program SAP2000 mengalami deformasi ke bawah sedangkan pada program ATENA mengalami deformasi ke atas.

Pada penelitian ini akan mencari nilai tegangan dan lendutan dari 3 variasi penampang jenis *PCI Girder* yang memiliki luasan dan jumlah tendon yang sama, mencari pengaruh total kehilangan prategang (*loss of prestress*) terhadap tegangan yang terjadi pada *PCI Girder*. Hasil dari nilai tegangan, lendutan serta total kehilangan prategang yang terjadi pada balok prategang akan menentukan variasi penampang yang paling efi untuk dijadikan struktur atas jembatan. Diharapkan dari hasil penelitian ini dapat memberikan pengetahuan tentang perancangan *girder* dengan referensi perhitungan yang sudah mengikuti SNI 1725-2016 dan dapat memberikan pilihan dalam menentukan bentuk *PCI Girder* yang efektif dalam pembuatan jembatan.

2. Prinsip Dasar Beton Prategang

Menurut Nawy dkk., (2001) balok persegi panjang yang ditumpu sederhana yang mengalami gaya prategang P kosentris mempunyai tegangan tegangan tekan yang seragam dan mempunyai intesitas. Rumus tegangan dapat menggunakan Persamaan 1.

$$f = -\frac{P}{A_c} \dots\dots\dots (1)$$

dengan:

$$A_c = b \times h$$

$$P = \text{gaya tekan}$$

Jika beban *transfersal* bekerja di balok yang menimbulkan momen ditengah bentang maka tegangan pada serta atas dapat dicari dengan Persamaan 2a.

$$f^t = -\frac{P}{A} - \frac{MC}{I_g} \dots\dots\dots (2a)$$

dan tegangan pada serat bawah dapat dilihat pada Persamaan 2b.

$$f_b = -\frac{P}{A} + \frac{MC}{I_g} \dots\dots\dots (2b)$$

- dengan: f^t = tegangan serat atas
 f_b = tegangan serat bawah
 c = $h/2$, untuk penampang persegi panjang
 I_g = $bh^3/12$, untuk momen inersia bruto penampang

Jika tendon diletakkan eksentris maka timbul momen P_e dan tegangan di tengah bentang. Tegangan yang terjadi dapat menggunakan Persamaan 3.

Tegangan pada serat atas:

$$f^t = -\frac{P}{A} + \frac{P_e c}{I_g} - \frac{MC}{I_g} \dots\dots\dots (3a)$$

Tegangan pada serat bawah:

$$f_b = -\frac{P}{A} - \frac{P_e c}{I_g} + \frac{MC}{I_g} \dots\dots\dots (3b)$$

dengan:

P_{ec} = eksentrisitas tendon

3. Metode Prategang

Dalam memasang baja prategang atau tendon, terdapat 2 metode yang dapat dilakukan:

- a. Pratarik (*Pre-Tension Method*)
Tendon diberikan gaya prategang terlebih dahulu (ditarik) sebelum beton segar dimasukkan kedalam cetakan beton prategang.
- b. Pascatarik (*Post-Tension Method*)
Baja prategang ditarik/ditegangkan pada beton yang sudah dicetak dan sudah mempunyai saluran untuk tendon yang akan dimasukkan kedalam beton, dan kemudian diangker terhadap beton itu sendiri.

4. Pembebanan Jembatan

Standar perhitungan pembebanan pada jembatan diambil dari (BSN, 2016). Pembebanan yang diperhitungkan yaitu:

- a. Berat mati
 - 1) Berat sendiri (MS)
Berat sendiri adalah berat bahan dari jembatan dan elemen-elemen struktural bagian dari jembatan

yang dipikulnya, ditambah dengan beban dari elemen non-struktural yang dianggap tetap, seperti berat balok prategang itu sendiri ditambah dengan berat diafragmanya.

- 2) Berat mati tambahan (MA)
Berat mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen non struktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan, seperti: beban aspal dan *overlay* + berat air hujan.

- b. Beban hidup (beban lalu lintas)
Beban hidup untuk perencanaan terdiri dari beban lajur (TD) dan beban truk (TT), sebagai berikut:

- 1) Beban lajur (TD)
Beban lajur bekerja di seluruh lebar jalur kendaraan yang terdiri atas beban terbagi merata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT). Beban terbagi merata (BTR) mempunyai intensitas q kPa dengan besar tergantung pada panjang bentang yang dibebani. Intesitas beban terbagi merata dapat dinyatakan dalam ketentuan berikut:

$q = 9,0$ kPa untuk $L \leq 30$ m
dan untuk $L > 30$ m intensitasnya dapat menggunakan Persamaan 4:

$$q = 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \dots\dots\dots (4)$$

Beban garis terpusat (BGT) mempunyai intensitas sebesar 49,0 kN/m.

- 2) Beban truk (TT)
Beban truk tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban lalu lintas. Beban truk digunakan untuk perhitungan struktur dengan bentang pendek.

- c. Gaya rem (TB)
Gaya rem diambil dalam perancangan jembatan dengan menggunakan nilai yang terbesar dari 25% dari berat gandar truk desain atau, 5% dari berat truk rencana di tambah beban lajur terbagi merata (BTR). Pengaruh pengereman

diasumsikan bekerja pada jarak 1.80 m di atas permukaan lantai jembatan.

d. **Pembebanan Pejalan Kaki (TP)**

Semua komponen trotoar yang lebih besar dari 600 mm harus direncanakan untuk memikul beban pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa dan dianggap bekerja secara bersamaan dengan beban kendaraan pada lajur kendaraan.

e. **Beban angin (EW)**

Jembatan harus mampu memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan dimana tekanan tersebut harus diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm tegak lurus dan bekerja 1,8 m di atas permukaan jalan.

f. **Beban gempa (EQ)**

Untuk mencari beban gempa pada struktur jembatan dapat menggunakan Persamaan 5.

$$E_Q = \frac{C_{sm}}{R} \times W_t \dots\dots\dots (5)$$

dengan:

- E_Q = gaya gempa horisontal statis (kN)
- C_{sm} = koefisien respon gempa elastik pada mode getar
- R = faktor modifikasi respon
- W_t = berat total struktur (beban mati dan beban hidup) (kN)

5. Posisi Tendon

Lintasan tendon pada beton prategang dapat menggunakan Persamaan 6 sebagai suatu pendekatan posisi tendon pada beton prategang.

$$y = 4 \times f \times \frac{X}{L^2} \times (L - X) \dots\dots\dots (6)$$

dengan:

- f = e_s (eksentrisitas) (m)
- X = jarak lintasan tendon (m)
- L = panjang balok (m)

6. Pemeriksaan Tegangan

a. **Kondisi awal (saat transfer)**

Untuk mencari nilai prategang awal P_i yang terjadi dapat menggunakan Persamaan 7.

Tegangan serat atas:

$$0,25\sqrt{fci} = \frac{-P_t}{A} + \frac{P_t \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a} \dots\dots (7a)$$

Tegangan serat bawah:

$$-0,6fci = \frac{-P_t}{A} - \frac{P_t \times e_s}{W_b} - \frac{M_{bs}}{W_b} \dots\dots (7b)$$

b. **Kondisi akhir (saat service)**

Tegangan pada balok prategang dapat dicari dengan Persamaan 8.

Diserat atas:

$$-0,45fci = \frac{-P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a} - \frac{M_{TD}}{W_a} \dots\dots\dots (8a)$$

Diserat bawah:

$$0,50\sqrt{fci} = \frac{-P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e_s}{W_b} - \frac{M_{bs}}{W_b} + \frac{M_{TD}}{W_b} \dots\dots\dots (8b)$$

dengan:

- P_t = gaya prategang awal
- P_{eff} = gaya prategang efektif
- A = luas penampang balok
- e_s = eksentrisitas
- M_{bs} = momen akibat berat sendiri
- W_a = tahanan momen seart atas (m^3)
- W_b = tahanan momen serat bawah (m^3)
- M_{TD} = momen maksimum pada balok akibat beban lajur "TD"

7. Kehilangan Prategang

Kehilangan prategang disebabkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah kehilangan tegangan akibat dudukan angker (A), kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton (ES), kehilangan tegangan akibat rangkai (CR), kehilangan tegangan akibat susut (SH), kehilangan tegangan akibat relaksasi baja (R), dan kehilangan tegangan akibat friksi/gesekan (F) (Nawy dkk., 2001).

a. **Kehilangan Tegangan akibat Dudukan Angker (A)**

Untuk mencari kehilangan tegangan akibat dudukan angker dapat menggunakan Persamaan 9.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} E_{ps} \dots\dots\dots (9)$$

dengan:

- Δ_A = besar gelincir (m)
- L = panjang tendon (m)
- E_{ps} = modulus elastisitas *strand* (MPa)

- b. Kehilangan Tegangan akibat Perpendekan Elastis Beton (*ES*)
 Karena tendon prategang mengalami perpendekan yang sama, maka perpendekan beton dapat di hitung dengan Persamaan 10.

$$\Delta_{pES} = E_S \epsilon_{ES} = \frac{E_S P_i}{A_c E_c} = \frac{n P_i}{A_c} = n f_{CS} \dots (10)$$

Jika tendon memiliki eksentrisitas dan momen akibat berat sendiri diperhitungkan maka tegangan yang terjadi beton pada pusat berat tendon baja prategang dapat dihitung dengan Persamaan 11.

$$f_{CS} = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{M_{De}}{I} \dots (11)$$

- c. Kehilangan Tegangan akibat Rangkak Beton (*CR*)

Kehilangan tegangan akibat rangkak beton dapat menggunakan Persamaan 12.

$$\Delta f_{pCR} = n K_{CR} (\bar{f}_{CS} - \bar{f}_{csd}) \dots (12)$$

dengan:

K_{CR} = 2,0 untuk komponen struktur pratarik atau 1,60 untuk komponen struktur pascatarik

f_{cs} = tegangan pada beton di pusat berat tendon setelah transfer

f_{csd} = tegangan pada beton di pusat berat tendon akibat semua beban mati tambahan setelah prategang diberikan

n = rasio modulus

- d. Kehilangan Tegangan akibat Susut (*SH*)

Rumus umum tegangan susut dapat dicari pada Persamaan 13. Pada perhitungan kehilangan tegangan akibat

susut memiliki koefisien untuk komponen struktur pascatarik yang dapat diambil pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai K_{SH} untuk komponen struktur pascatarik (*Prestressed Concrete Institute, 1999*)

T	1	3	5	7	10	20	30	60
K_{SH}	0,92	0,85	0,80	0,77	0,73	0,64	0,58	0,45

$$\Delta f_{pSH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{SH} E_{ps} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S}\right) (100 - RH) \dots (13)$$

dengan:

K_{SH} = koefisien untuk komponen struktur pascatarik

E_{ps} = modulus elastisitas baja prategang

V/S = rasio volum-permukaan

RH = persen kelembaban *relative*

- e. Kehilangan Tegangan akibat Relaksasi Baja (*R*)

Kehilangan tegangan akibat relaksasi baja dapat menggunakan Persamaan 14.

$$\Delta f_{pR} = [K_{re} - J] (f_{pES} + f_{pCR} + f_{pSH}) \times C \dots (14)$$

dengan:

Nilai koefisien K_{RE} dan J diambil pada Tabel 2

Nilai koefisien C diambil pada Tabel 3

f_{pES} = kehilangan tegangan akibat elastis beton

f_{pCR} = kehilangan tegangan akibat rayapan

f_{pSH} = kehilangan tegangan akibat susut

Tabel 2 Nilai K_{RE} dan J (*Post-Tensioning Institute, 2000*)

Jenis tendon ^a	K_{RE}	J
Kawat atau <i>stress-relieved strand</i> mutu 270	20000	0,15
Kawat atau <i>stress-relieved strand</i> mutu 250	18500	0,14
Kawat <i>stress-relieved strand</i> mutu 240 atau 350	17600	0,13
<i>Strand</i> relaksasi rendah mutu 270	5000	0,04
Kawat relaksasi rendah mutu 250	4630	0,037
Kawat relaksasi rendah mutu 240 atau 235	4400	0,035
Batang <i>stress-relieved</i> mutu 145 atau 160	6000	0,05

Tabel 3 Nilai C (*Post-Tensioning Institute, 2000*)

f_{pi}/f_{pu}	<i>strand stressrelieve</i>	strand relaksasi rendah atau batang <i>stress-relieved</i>
0,80		1,28
0,79		1,22
0,78		1,16
0,77		1,11
0,76		1,05
0,75	1,45	1,00
0,74	1,36	0,95
0,73	1,27	0,90
0,72	1,18	0,85
0,71	1,09	0,80
0,70	1,00	0,75
0,69	0,94	0,70
0,68	0,89	0,66
0,67	0,83	0,61
0,66	0,78	0,57
0,65	0,73	0,53
0,64	0,68	0,49
0,63	0,63	0,45
0,62	0,58	0,41
0,61	0,53	0,37
0,60	0,49	0,33

- f. Kehilangan Tegangan akibat Friksi (F)
 Kehilangan tegangan akibat gesekan dapat dinyatakan dengan Persamaan 15.

$$\Delta f_{pF} = -f_1 (\mu a + KL) \dots\dots\dots (15)$$

dengan:

- f_1 = tegangan yang terjadi akibat gaya prategang awal P_i
- μ = koefisien kelengkungan
- K = koefisien *wobble*

8. Lendutan pada Balok Prategang

Dasar mekanika bahan untuk menghitung defleksi tengah bentang pada balok yang ditumpu sederhana yang dibebani terbagi merata dengan menggunakan Persamaan 16 dan lendutan maksimum yang di izinkan nilai kurang dari $L/240$.

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{w l^4}{E_c I_x} \dots\dots\dots (16)$$

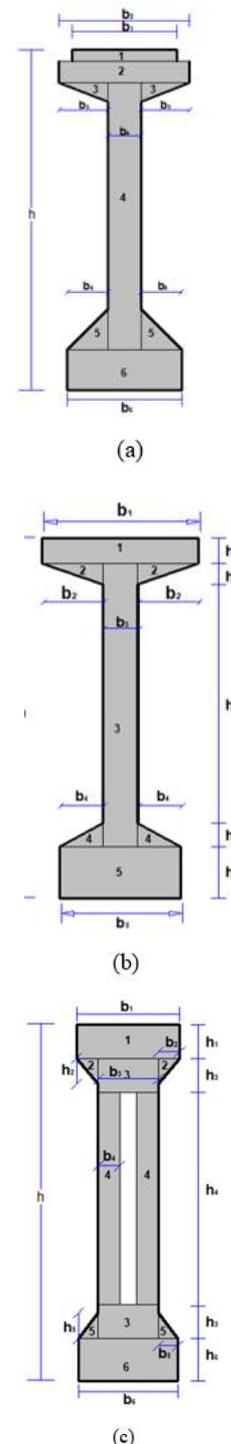
dengan:

- δ = defleksi (m)
- w = beban (kN/m)
- l = panjang bentang (m)
- E_c = modulus elastisitas beton (kPa)
- I_x = momen inersia efektif untuk penampang defleksi (m^4)

9. Metode Penelitian

Penampang PCI Girder

Metode pengumpulan data yang dipakai adalah metode studi kepustakaan (*literature research*). Bentuk dan ukuran penampang dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1 dan Tabel 4.



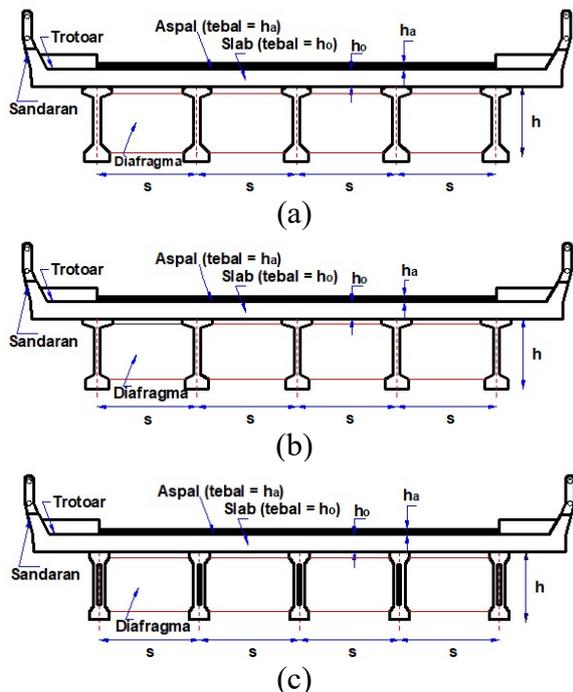
Gambar 1 Bentuk penampang PCI girder (a) penampang tipe 1, (b) penampang tipe 2, (b) penampang tipe 3 (c)

Tabel 4 Data spesifikasi *PCI Girder*

No.	Simbol	Tipe 1 (m)	Tipe 2 (m)	Tipe 3 (m)
1.	b ₁	0,64	0,90	0,60
2.	b ₂	0,80	0,35	0,15
3.	b ₃	0,30	0,20	0,35
4.	b ₄	0,20	0,25	0,125
5.	b ₅	0,25	0,70	0,115
6.	b ₆	0,70	-	0,58
7.	h ₁	0,07	0,15	0,20
8.	h ₂	0,13	0,12	0,14
9.	h ₃	0,12	1,65	0,20
10.	h ₄	1,65	0,14	1,25
11.	h ₅	0,25	0,30	0,15
12.	h ₆	0,25	-	0,25

Data Jembatan

Data-data jembatan yang digunakan baik itu data umum, beton dan baja prategang adalah data jembatan yang diasumsikan dari data jembatan prategang pada umumnya. Data jembatan dapat dilihat pada Gambar 2 dan Tabel 5 sedangkan data *specific gravity* pada Tabel 6.



Gambar 2 Gambar jembatan dan penampang tipe 1 (a) penampang tipe 2 (b) penampang tipe 3 (c)

Tabel 5 Data jembatan

Uraian	Notasi	Dimensi (m)
Panjang bentang	L	40,00
Jarak antara balok prategang	S	1,80
Tebal plat lantai jembatan	h_0	0,20
Tebal lapisan aspal + <i>overlay</i>	h_a	0,10
Tinggi genangan air hujan	t_h	0,05

Tabel 6 *Specific gravity*

Uraian	Notasi	Berat (kn/m ³)
Beton prategang	W_c	25,50
Beton bertulang	W_c'	25,00
Beton	W_c''	24,00
Aspal	W_{aspal}	22,00
Air Hujan	W_{air}	9,80

Data beton dan baja prategang yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8. Baja prategang yang digunakan adalah banyak dengan standar *VSL*

Tabel 7 Data Beton

Uraian	Notasi	Satuan
Mutu beton balok	K-500	
Kuat tekan balok, f_c	41,50	MPa
Modulus elastisitas, E_c	30277,63	MPa
Angka <i>poisson</i> , ν	0,15	
Modulus geser, G	13164,19	MPa
Koefisien muai panjang, α	0,00001	$^{\circ}C$
Mutu plat	K-300	
Kuat tekan plat, f_c	24,90	MPa
Modulus elastisitas plat	23452,95	MPa

Tabel 8 Data *Strands* (ASTM, 2017)

Jenis <i>strands</i>	<i>Uncoated 7 wire super strands ASTM A - 416 grade 270</i>	
Tegangan leleh <i>strands</i>	f_{py}	1580 MPa
Kuat tarik <i>strands</i>	f_{pu}	1860 MPa
Diameter nominal <i>strands</i>		12,70 mm (1/2")
Luas tampang nominal satu <i>strands</i>	A_{st}	98,70 mm ²
Beban putus minimal satu <i>strands</i>	P_{bs}	183,32 kN (100% UTS)
Jumlah kawat untaian (<i>strands cable</i>)		19 kawat untaian/tendon
Diameter selubung ideal		84,00 mm
Luas tampang <i>strands</i>		1875,30 mm ²
Beban putus satu tendon	P_{b1}	3559,10 kN (100% UTS)
Modulus elastis <i>strands</i>	E_s	193000 MPa
Tipe dongkrak		VSL19

10. Hasil dan Pembahasan

Analisis Penampang

Analisis penampang *PCI Girder* dibagi menjadi 2 yaitu beton prategang itu sendiri dan beton prategang komposit (ditambah dengan plat lantai). Analisis penampang terdiri dari luasan penampang (A), Momen inersia (I_o), momen inersia terhadap titik berat balok (I_x), tahanan momen sisi atas (W_a), tahanan momen sisi bawah (W_b). Hasil analisis penampang dapat dilihat dalam Tabel 9 dan Tabel 10.

Tabel 9 Hasil analisis penampang *PCI Girder*

No.	Notasi	Tipe 1	Tipe 2	Tipe 3
1.	A	0,752 m ²	0,752 m ²	0,752 m ²
2.	I _o	0,0762 m ⁴	0,0768 m ⁴	0,0424 m ⁴
3.	I _x	0,4073 m ⁴	0,4227 m ⁴	0,344 m ⁴
4.	W _a	0,3768 m ³	0,3292 m ³	0,3736 m ³
5.	W _b	0,3998 m ³	0,4128 m ³	0,2924 m ³

Dari hasil analisis penampang diketahui bahwa penampang balok prategang tipe 3 memiliki nilai momen inersia yang lebih kecil dengan nilai 0,0424 m⁴ dan

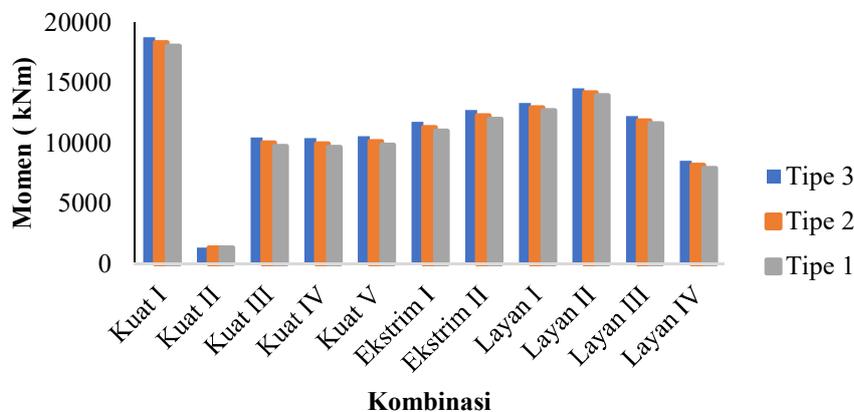
0,04314 m⁴ untuk komposit, dibandingkan dengan penampang tipe 1 yang memiliki nilai momen inersia 0,0762 m⁴; 0,07698 m⁴ untuk komposit dan penampang tipe 2 dengan nilai 0,0768 m⁴ dan 0,7756 m⁴ untuk komposit.

Tabel 10 Hasil analisis penampang *PCI Girder + plat lantai*

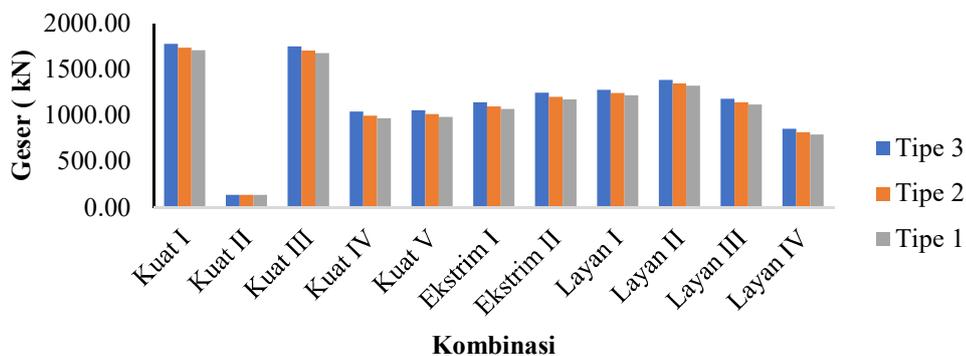
No.	Notasi	Tipe 1	Tipe 2	Tipe 3
1.	A _c	0,989 m ²	0,989 m ²	0,989 m ²
2.	I _{oc}	0,0770 m ⁴	0,0776 m ⁴	0,0431 m ⁴
3.	I _{xc}	0,407 m ⁴	0,627 m ⁴	0,533 m ⁴
4.	W _{ac}	0,666 m ³	0,676 m ³	0,608 m ³
5.	W' _{ac}	0,832 m ³	0,847 m ³	0,787 m ³
6.	W _{bc}	0,515 m ³	0,515 m ³	0,375 m ³

Pembebanan Balok Prategang

Hasil kombinasi momen akibat pembebanan dari ketiga penampang dapat dilihat pada Gambar 3 yang nilai di ambil pada tengah bentang atau pada jarak 20 m dari tumpuan. Dari hasil kombinasi momen dapat diketahui bahwa ketiga penampang memiliki nilai momen yang hampir sama disetiap kombinasi



Gambar 3 Kombinasi momen pada *PCI Girder*



Gambar 4 Kombinasi gaya geser pada *PCI Girder*

Hasil kombinasi geser akibat pembebanan dapat dilihat pada Gambar 4 nilai di ambil pada tumpuan beton prategang atau pada ujung bentang beton prategang. Dari hasil kombinasi geser dapat diketahui bahwa ketiga penampang memiliki nilai geser yang hampir sama disetiap kombinasi.

Gaya Prategang Awal

Gaya prategang awal (P_1) yang terjadi pada penampang beton prategang tipe 1 memiliki nilai sebesar 62517,148 kN, tipe 2

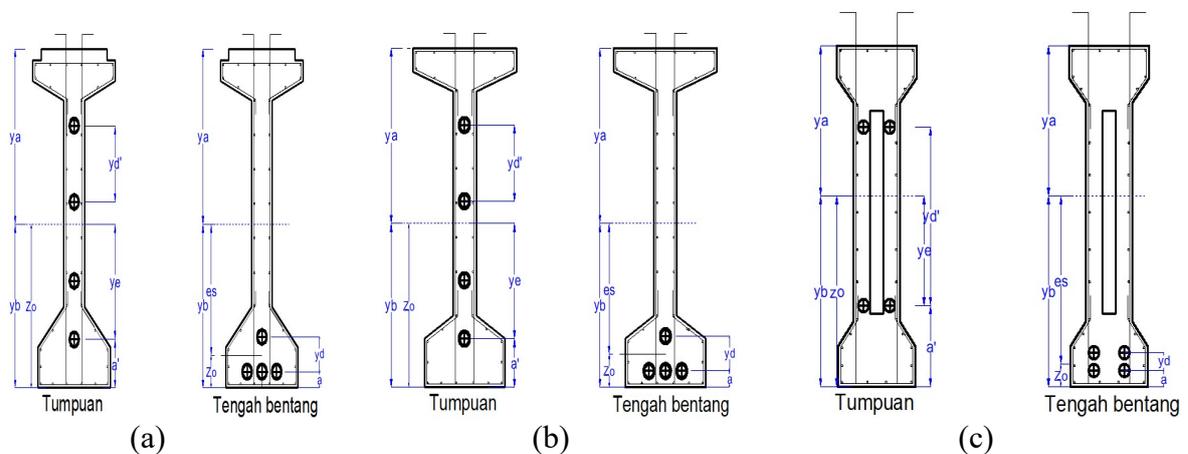
sebesar 63294,964 kN dan tipe 3 sebesar 66048,147 kN. Dari hasil tersebut gaya prategang awal terbesar terjadi pada penampang tipe 3.

Posisi Tendon

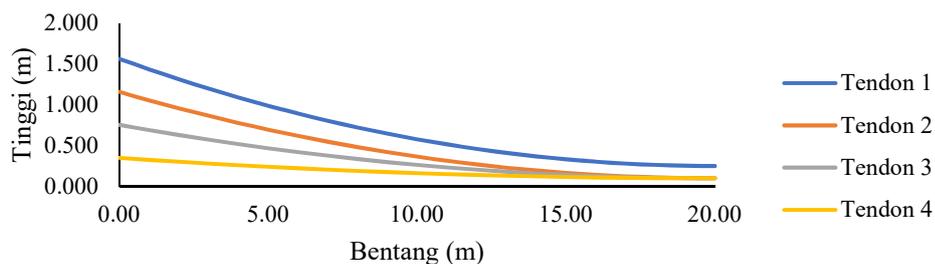
Banyaknya tendon yang digunakan pada setiap penampang disajikan dalam Tabel 11. Posisi tendon dan arah lintasan tendon disetiap penampang dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6.

Tabel 11 Banyak tendon yang digunakan

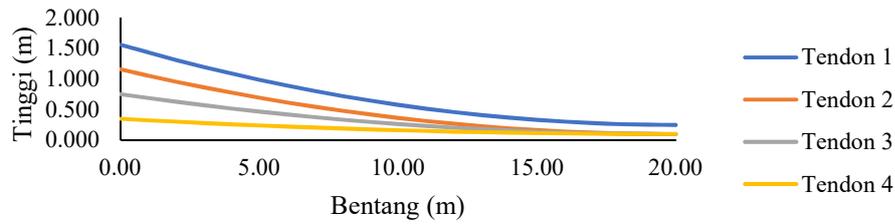
Penampang	Tendon/baris	Strands	Selubung Tendon
Tipe 1	1	19	84 mm
	1	19	84 mm
	1	19	84 mm
	1	12	76 mm
Tipe 2	1	19	84 mm
	1	19	84 mm
	1	19	84 mm
	1	12	76 mm
Tipe 3	2	19	84 mm
	2	17	84 mm



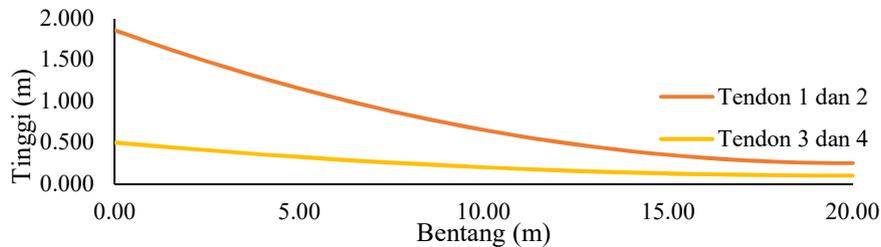
Gambar 5 Posisi tendon penampang tipe 1 (a), penampang tipe 2 (b), dan penampang tipe 3 (c)



(a)



(b)

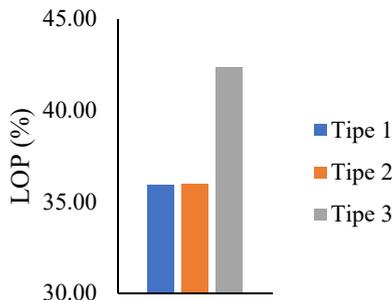


(c)

Gambar 6 Arah lintas tendon penampang tipe 1 (a), penampang tipe 2 (b), dan penampang tipe 3 (c)

Kehilangan Gaya Prategang (Loss of Prestress)

Total kehilangan gaya prategang pada ketiga penampang balok prategang disajikan dalam Gambar 7.



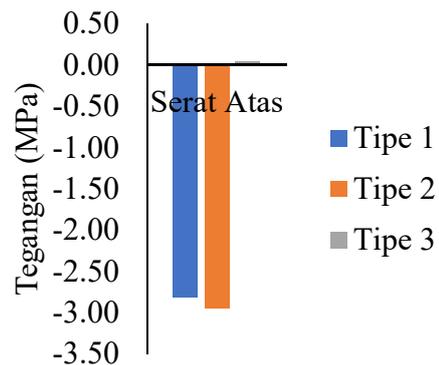
Gambar 7 Total *loss of prestress*

Dari hasil total kehilangan gaya prategang diketahui bahwa penampang tipe 3 mempunyai nilai tertinggi sebesar 42,46 % dengan tegangan yang terjadi pasca Tarik sebesar 1054 MPa sedangkan untuk penampang tipe 1 dan 2 sebesar 35,91% dengan tegangan sebesar 1204 MPa dan 35,96% dengan tegangan sebesar 1203 MPa. Ketiga penampang masih memenuhi tegangan izin $0,7 \cdot f_{PU}$ sebesar 1302 MPa yang diberikan atau masih dalam kondisi aman.

Tegangan yang Terjadi Pada Penampang

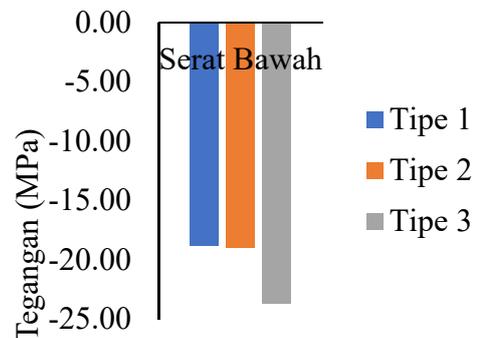
Nilai tegangan beton saat *transfer* di serat atas dan tegangan di serat bawah pada

ketiga penampang dapat dilihat pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8 Tegangan serat atas keadaan awal

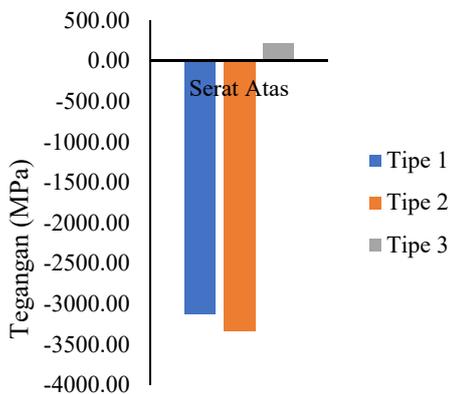
Dari analisis tegangan pada keadaan awal penampang tipe 1, penampang tipe 2, dan penampang tipe 3 memiliki nilai tegangan sebesar -2,81 MPa, -2,95 MPa dan 0,05 MPa.



Gambar 9 Tegangan serat bawah keadaan awal

Dari hasil analisis, penampang tipe 3 memiliki nilai tegangan serat bawah terbesar dengan nilai $-23,65$ MPa sedangkan penampang tipe 1 dan penampang tipe 2 memiliki nilai tegangan sebesar $-18,80$ MPa dan $-19,01$ MPa. Nilai tegangan yang terjadi pada serat atas dan bawah balok prategang dari ketiga penampang tersebut masih dalam kondisi aman dengan tegangan kurang dari tegangan ijin sebesar $33,20$ MPa.

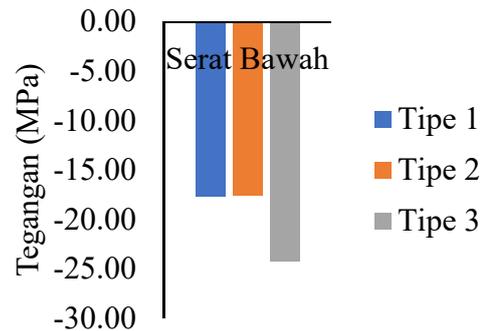
Nilai tegangan setelah kehilangan prategang pada serat atas dan tegangan pada serat bawah pada ketiga penampang dapat dilihat pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10 Tegangan serat atas setelah kehilangan prategang

Nilai tegangan serat atas setelah kehilangan prategang pada penampang tipe 1

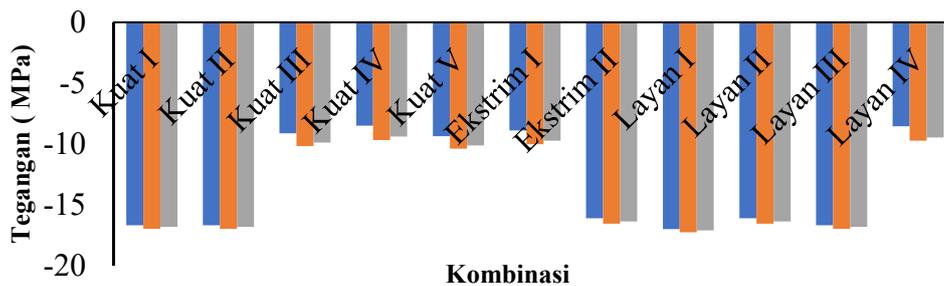
sebesar $-3,12$ MPa, penampang tipe 2 memiliki tegangan sebesar $-3,33$ MPa, dan penampang tipe 3 sebesar $0,22$ MPa.



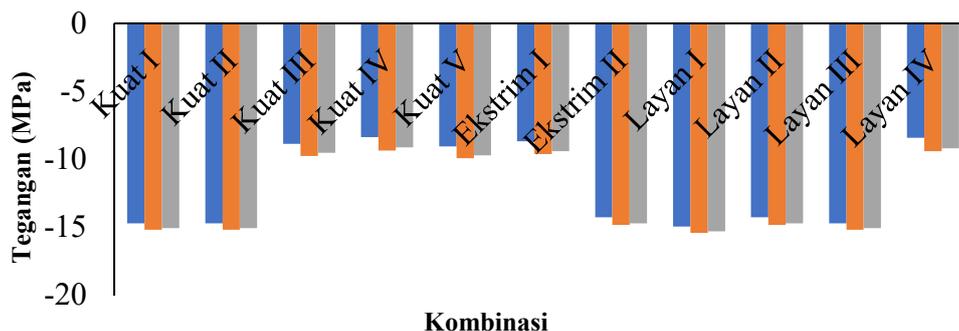
Gambar 11 Tegangan serat bawah setelah kehilangan prategang

Nilai tegangan serat bawah setelah kehilangan prategang pada penampang tipe 1 sebesar $-17,70$ MPa, penampang tipe 2 memiliki tegangan sebesar $-17,57$ MPa, dalam kategori aman dan penampang tipe 3 sebesar $-24,22$ MPa dalam kategori tidak aman, karena tegangan yang terjadi pada serat bawah penampang tipe 3 melewati batas tegangan ijin tekan sebesar $-18,68$ MPa.

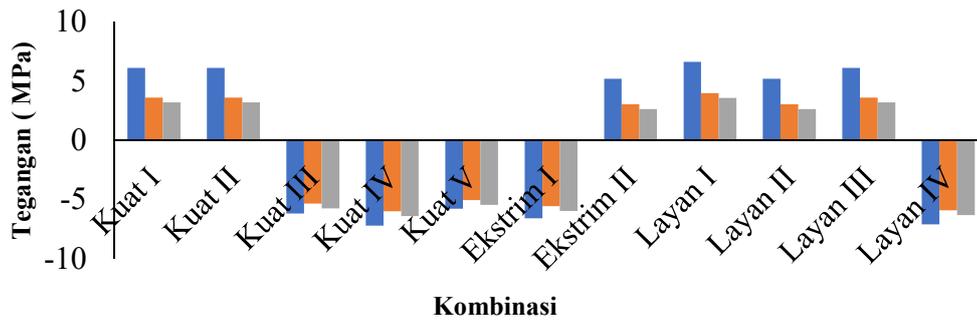
Nilai kombinasi tegangan setelah beton prategang menjadi komposit dapat dilihat pada Gambar 12 untuk tegangan yang terjadi di plat lantai beton, Gambar 13 untuk tegangan pada beton serat atas, dan Gambar 14 untuk tegangan yang terjadi pada serat bawah beton.



Gambar 12 Kombinasi tegangan pada plat beton



Gambar 13 Kombinasi tegangan pada serat atas beton prategang



Gambar 14 Kombinasi tegangan pada serat bawah beton prategang

Dari hasil kombinasi tegangan pada plat dan serat atas beton, penampang tipe 2 memiliki tegangan maksimum dengan nilai -17,26 MPa dan -15,14 MPa yang lebih besar dari penampang tipe 1 dan penampang tipe 3. Tegangan yang terjadi pada ketiga penampang masih dalam kondisi aman, dengan tegangan ijin tekan (f_c') sebesar -18,68 MPa.

Dari hasil kombinasi tegangan pada serat bawah balok prategang, penampang tipe 3 memiliki tegangan maksimum dengan nilai -7,21 MPa yang lebih besar dari penampang tipe 1 dan penampang tipe 2. Nilai kombinasi tegangan pada serat bawah balok prategang di ketiga penampang pada kondisi tarik dan tekan masih aman karena belum melewati batas tegangan ijin tarik sebesar 11,18 MPa dan tegangan ijin tekan sebesar -18,68 MPa.

Lendutan Pada Balok Prategang

Nilai lendutan yang terjadi pada balok prategang sebelum menjadi komposit dapat dilihat pada Tabel 12, lendutan setelah kehilangan prategang dapat dilihat pada

Tabel 13 dan lendutan akibat pembebanan pada Gambar 15.

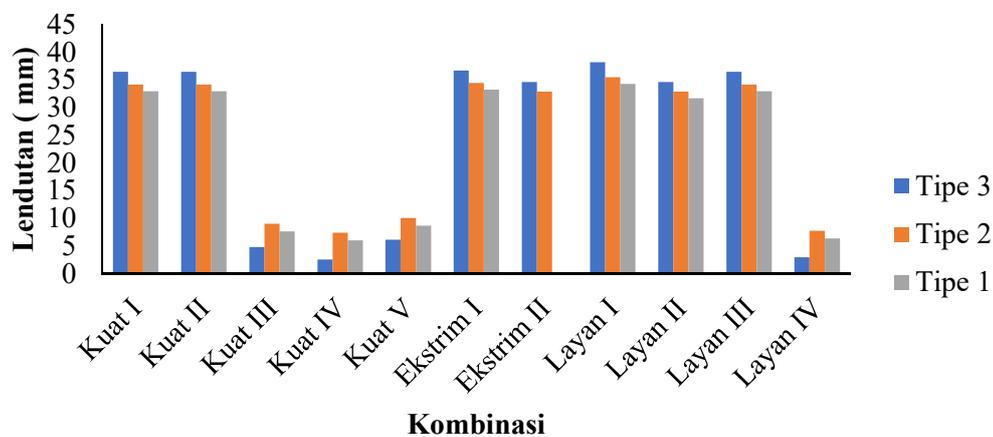
Tabel 12 Lendutan balok prategang keadaan awal (*transfer*)

No.	Penampang	Lendutan (mm)	Arah lendutan
1.	Tipe 1	-36	Ke atas
2.	Tipe 2	-36	Ke atas
3.	Tipe 3	-53	Ke atas

Dari hasil lendutan yang didapat. Penampang tipe 3 memiliki nilai lendutan yang lebih besar dari pada penampang tipe 1 dan tipe 2 dengan nilai sebesar -53 mm. sedangkan penampang tipe 1 dan 2 memiliki nilai yang sama sebesar -36 mm.

Tabel 13 Lendutan balok prategang setelah kehilangan gaya prategang

No.	Penampang	Lendutan (mm)	Arah lendutan
1.	Tipe 1	-32	Ke atas
2.	Tipe 2	-32	Ke atas
3.	Tipe 3	-54	Ke atas



Gambar 15 Kombinasi lendutan akibat beban

Dari hasil lendutan setelah kehilangan prategang, penampang tipe 3 memiliki nilai lendutan yang lebih besar dari pada penampang tipe 1 dan tipe 2 dengan nilai sebesar -54 mm. Sedangkan penampang tipe 1 dan 2 memiliki nilai yang sama sebesar -32 mm.

Dari diagram batang diatas dapat diketahui bahwa penampang tipe 3 memiliki nilai lendutan maksimum pada kombinasi Layan 1 dengan nilai sebesar 38,1 mm lebih besar dari penampang tipe 1 dan penampang tipe 2. Nilai lendutan pada setiap kombinasi di ketiga penampang masih memenuhi nilai lendutan ijin pada balok prategang sebesar $L < 240$.

11. Kesimpulan

Adapun dari hasil penelitian tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a) Nilai kombinasi tegangan maksimum dan lendutan maksimum dari hasil analisis didapatkan bahwa penampang tipe 2 memiliki tegangan maksimum pada serat atas beton dengan nilai -15,14 MPa, pada serat bawah penampang tipe 3 memiliki tegangan maksimum dengan nilai -7,21 MPa, dan lendutan maksimum yang terjadi ada pada penampang 3 dengan nilai lendutan sebesar 38,1 mm.
- b) Nilai total *loss of prestress* yang terbesar dari penampang tipe 3 dengan nilai 42,6 %. Hal ini menyebabkan tegangan yang terjadi pada penampang tipe 3 saat kehilangan prategang menjadi besar dan membuat penampang tipe 3 tidak aman.
- c) Dari hasil analisis tegangan dan lendutan dapat disimpulkan penampang yang paling efektif dari ketiga penampang adalah efektif penampang tipe 1.

12. Daftar Pustaka

- ASTM A416/ A416M-17, Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- Badan Standardisasi Nasional., 2016, *Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725-2016*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Hady, M., Saidi, T., & Hasan, M., 2018, Tinjauan Ulang Two-Cell Box Girder Beton Prategang Terhadap Kapasitas Dukung Beban Lalu Lintas Pada Perencanaan Pembangunan Fly Over Simpang Surabaya Kota Banda. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(3), 223-232.
- Hardwiyono, S., Soebandono, B., & Hakim, L., 2015, Perancangan Ulang Struktur Atas Jembatan Gajah Wong Yogyakarta dengan Menggunakan Box Girder. *Jurnal Semesta Teknika*, 16(1), 10-20.
- Leo, E., & MH, N. A., 2017, Kajian Efisiensi Blub-Tee Shape and Half Slab Girder dengan Blister Tunggal Terhadap *PC-I Girder*. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran dan Ilmu Kesehatan*, 1(1), 309-317.
- Meidiansyah, A. F., Purwanto, M. Y. J., & Fauzan, M., 2016, Analisis Struktur Box Girder Jembatan Fly Over Rawa Buaya Sisi Barat Terhadap Gempa. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 1(1), 42-56.
- Nawy, E. G., Hardani, W., & Suryoatmono, B., 2001, *Beton prategang: suatu pendekatan mendasar*. Erlangga.
- Nurrianto, F., Iswanto, K. A., Yulipriyono, E. E., & Adi, R. Y., 2013. Perancangan Jalan Layang Akses Terminal a Mangkang Semarang. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 2(2), 219-227.
- Post-Tensioning Institute, 2000. *Post Tensioning Manual*, 6th Ed., Phoenix, AZ.
- Prestressed Concrete Institute, 1999. *PCI Design Handbook*. Chicago: Prestressed Concrete Institute, 5th ed.
- Putra, B. P., Muntafi, Y., & Suharyatmo, S., 2017, Studi Perbandingan Penggunaan PCU Girder dan PCI Girder Pada Struktur Atas Jembatan Jurang Gempal, Wonogiri. *Jurnal Teknisia*, 22(1), 333-346.
- Santosa, A., Sugiyanto, S., Wicaksono, Y. I., & Atmono, I. D., 2015, Perencanaan Jembatan Prategang Kali Suru

- Pemalang. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 4(4), 1-12.
- Setyawan, A., & Sulistyono, I. I. D., 2012. Analisis NonLinier Tegangan Dan Deformasi Struktur Jembatan Beton Prategang Pada Tahap Konstruksi Dengan Metode Balanced Cantilever. *Jurnal Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan*, 13(2), 33-39.
- Wakid, M., Kristiawan, S. A., & Rahmadi, A. P., 2016, Perkuatan Struktur Atas Jembatan Komposit dengan Metode Prategang Eksternal. *Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 60-65.
- Wicaksono, K. A., Saadati, K., Purwanto, P., & Sukamta, S., 2016, Perencanaan Struktur Jembatan Slab on Pile Sungai Brantas Dengan Menggunakan Metode Pracetak Pada Proyek Tol Solo–Kertosono Sta. 176+ 050–Sta. 176+ 375. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 5(2), 275-282.