

## Studi Alternatif *Loss of Prestress PC I Girder Akibat Metode Single Stressing dan Double Stressing pada Section Overpass STA 52+174 Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda*

**Sujati Jepriani<sup>(\*)</sup>**

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda, Jl. Dr. Cipto Mangunkusumo, Kampus Gunung Lipan Samarinda, Indonesia, E-mail: sujati\_jepriani@polnes.ac.id

**Willy Susanto**

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda, Jl. Dr. Cipto Mangunkusumo, Kampus Gunung Lipan Samarinda, Indonesia, E-mail: willy.susanto056@gmail.com

**Joko Suryono**

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda, Jl. Dr. Cipto Mangunkusumo, Kampus Gunung Lipan, Samarinda, Indonesia, E-mail: jokosuryono55@gmail.com

### Abstrak

*Salah satu pekerjaan penting yang dilakukan pada beton prategang yaitu proses pemberian tegangan (stressing). Pemberian tegangan pada beton prategang mengakibatkan kehilangan gaya prategang yang harus dipertimbangkan pada perencanaan. Metode stressing pada beton pascatarik dapat dilakukan dengan metode satu arah (single stressing) dan metode dua arah (double stressing). Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai kehilangan gaya prategang pada girder jembatan akibat stressing dengan metode satu arah dan metode dua arah serta mengetahui pengaruh panjang bentang girder terhadap kehilangan gaya prategang. Analisis yang dilakukan meliputi menghitung pembebahan dan gaya prategang, menghitung kehilangan prategang akibat metode stressing satu arah dan dua arah, serta kontrol tegangan dan lendutan pada girder. Jenis girder yang digunakan pada penelitian ini adalah PC I girder dengan bentang 25,80 m dan 16,80 m. Dari hasil analisis diperoleh bahwa metode penarikan satu arah menghasilkan kehilangan gaya prategang lebih besar dibandingkan dengan metode penarikan dua arah. Kehilangan gaya prategang akibat penarikan satu arah pada PC I girder bentang 25,80 m adalah sebesar 25,03 % dan sebesar 27,18% pada PC I girder bentang 16,80 m. Kehilangan gaya prategang akibat penarikan dua arah pada PC I girder bentang 25,80 m adalah sebesar 17,22 % dan sebesar 24,12% pada PC I girder bentang 16,80 m. Kehilangan gaya prategang pada PC I girder bentang 25,80 m nilainya lebih kecil dibandingkan kehilangan gaya prategang pada PC I girder bentang 16,80 m.*

**Kata-kata Kunci:** Beton prategang, kehilangan gaya prategang, metode stressing, penarikan dua arah, penarikan satu arah.

### Abstract

*One of the important work carried out on prestressed concrete is the stressing process. The application of stress to prestressed concrete results in a loss of prestressing force which must be considered in the design. Theoretically, the stressing method of post-tensioned concrete can be carried out using a single stressing method and a double stressing method. The purpose of this study was to determine the value of the loss of prestressing force on the bridge girder due to stressing with the one-way method and the two-way method and to determine the effect of the length of the girder span on the loss of the prestressing force. The analysis carried out includes calculating the load and prestressing force, calculating the prestress loss due to one-way and two-way stressing methods, and controlling stress and deflection on the girder. The type of girder used in this study is a PC I girder with a span of 25,80 m and 16,80 m. From the results of the analysis, it was found that the one-way pulling method resulted in a greater loss of prestressing force than the two-way pulling method. Loss of prestressing force due to one-way tension on a PC I girder span of 25,80 m is 25,03% and 27,18% in a PC I girder span of 16,80 m. Loss of prestressing force due to two-way tension on a PC I girder span of 25,80 m is 17,22% and 24,12% at a PC I girder span of 16,80 m. The loss of prestressing force on the PC I girder span of 25,80 m is smaller than the loss of prestressing force on the PC I girder span of 16,80 m.*

**Keywords:** Double stressing, loss of prestressing force, prestressed concrete, single stressing, stressing method

\* Penulis Korespondensi

## 1. Pendahuluan

Jembatan adalah suatu struktur yang berfungsi menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan seperti lembah, sungai, laut, jurang, drainase, jalan, dan sebagainya. Jembatan mempunyai fungsi sebagai penghubung dua daerah yang terpisah untuk melancarkan dan memudahkan kegiatan manusia (BSN, 2008). Tipe jembatan yang sering digunakan di Indonesia meliputi jembatan kayu, jembatan beton bertulang, jembatan baja, dan jembatan beton prategang. Overpass jalan tol Balikpapan - Samarinda STA 52+174 mengaplikasikan jembatan dengan sistem beton prategang (*prestressed concrete*) di bagian struktur atas (*superstructures*) yaitu pada gelagar atau *girder*. Menurut sistem perancangannya, girder terdiri dari dua jenis yaitu *girder precast* dan *on site girder*. *Girder* sendiri memiliki banyak bentuk salah satunya *PC I girder*, yaitu *girder* jembatan yang memiliki bentuk penampang I dengan penampang bagian tengah lebih langsing daripada bagian pinggir. Oleh sebab itu biasanya dari hasil analisis *PC I girder* adalah penampang yang ekonomis. Penampang *PC I girder* dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1. PC I girder**

Dalam perencanaan struktur jembatan beton prategang kehilangan gaya prategang harus dipertimbangkan, karena tegangan pada tendon beton prategang berkurang secara kontinu seiring berjalaninya waktu. Salah satu pekerjaan penting yang harus dilakukan pada beton prategang adalah proses pemberian tegangan (*stressing*) yang dilakukan sebelum beton dicetak (*pre-tensioning*) atau setelah beton dicetak (*post-tensioning*). Pemberian tegangan pada beton prategang mengakibatkan kehilangan gaya prategang (*loss of prestress*) dikarenakan tegangan pada tendon berkurang secara kontinu seiring berjalaninya waktu. Secara teori metode stressing pada beton pascatarik (*post-tensioning*) dapat dilakukan dengan metode satu arah (*single stressing*) dan metode dua arah (*double stressing*). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai *loss of prestress* akibat *stressing* dengan metode satu arah (*single stressing*) dan metode dua arah (*double stressing*) pada *PC I girder* jembatan di jalan tol Balikpapan-Samarinda. Walaupun pada beberapa penelitian menyatakan bahwa nilai *loss of prestress*

akibat *stressing* dengan metode satu arah (*single stressing*) nilainya lebih besar dibanding dengan metode dua arah (*double stressing*), namun belum dibahas bagaimana pengaruh panjang bentang *girder* terhadap kehilangan gaya prategang. Oleh karena itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk menentukan metode *stressing* yang dapat diterapkan pada proyek jembatan beton prategang.

## 2. Tinjauan Pustaka

Kehilangan prategang adalah kerugian gaya yang bekerja pada tendon dalam tahap-tahap pembebangan. Di dalam suatu sistem struktur beton prategang selalu terdapat kehilangan prategang, baik akibat sistem penegangan maupun akibat pengaruh waktu. (Nawy, 2001)

Kehilangan prategang langsung disebabkan oleh perpendekan elastis dari beton, gesekan sepanjang kelengkungan tendon pada struktur pascatarik dan slip pada angkur. Sedangkan kehilangan prategang akibat pengaruh waktu disebabkan oleh perpendekan dari beton pada level baja akibat rangkap dan penyusutan beton serta relaksasi baja. Berdasarkan hasil penelitian dari Rizkia, dkk., (2017) diperoleh bahwa kehilangan prategang akibat metode *stressing* menghasilkan perbedaan kehilangan prategang akibat perpendekan elastis beton dan relaksasi baja.

Perhitungan jumlah keseluruhan kehilangan prategang antara pratarik dan pascatarik sangat berbeda, karena perbedaan metode yang digunakan. Total kehilangan prategang dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut:

Untuk komponen struktur pratarik,

$$\Delta f_T = \Delta f_{ES} + \Delta f_{FR} + \Delta f_{CR} + \Delta f_{SH} \quad (1)$$

Untuk komponen struktur pascatarik,

$$\Delta f_T = \Delta f_{ES} + \Delta f_{FR} + \Delta f_a + \Delta f_{CR} + \Delta f_{SH} + \Delta f_{RE} \quad (2)$$

Keterangan:

$\Delta f_T$  = total kehilangan prategang (MPa)

$\Delta f_{ES}$  = kehilangan prategang akibat perpendekan beton (MPa)

$\Delta f_{FR}$  = kehilangan prategang akibat gesekan kabel (MPa)

$\Delta f_a$  = kehilangan prategang akibat slip angkur (MPa)

$\Delta f_{CR}$  = kehilangan prategang akibat rangkap beton (MPa)

$\Delta f_{SH}$  = kehilangan prategang akibat susut beton (MPa)

$\Delta f_{RE}$  = kehilangan prategang akibat relaksasi baja (MPa)

### 2.1 Kehilangan akibat gesekan kabel prategang (*friction and wobble effect*)

Kehilangan tegangan akibat gesekan antara tendon dan selubung beton sekitarnya dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$f_0 = f_x e^{-(\mu\alpha + KL)} \quad (3)$$

Kehilangan tegangan baja dinyatakan sebagai  $\Delta f_f = f_0 - f_x$ , tegangan baja pada pendongkrakan akhir adalah  $f_0$ , dan panjang sampai ke titik yang ditinjau adalah  $L$ , sehingga diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$\Delta f_{FR} = f_0 - f_x = f_0 - f_0 e^{-(\mu\alpha + KL)} = f_0 [1 - e^{-(\mu\alpha + KL)}] \quad (4)$$

Keterangan:

$f_0$  = tegangan baja prategang pada saat jacking sebelum seating

$f_x$  = tegangan baja prategang di titik x sepanjang tendon

$e$  = eksponensial atau 2,7183

$\mu$  = koefisien gesek kelengkungan (**Tabel 1**)

$\alpha$  = perubahan sudut dari layout kabel dalam radian dari titik jacking

$K$  = koefisien wobble (**Tabel 1**)

$L$  = panjang baja prategang diukur dari titik jacking

Dengan mengasumsikan bahwa kelengkungan tendon sesuai dengan busur lingkaran pada **Gambar 2**, maka sudut pusat  $\alpha$  di sepanjang segmen yang melengkung dapat dihitung besarnya dua kali kemiringan di ujung segmen. Sehingga jika dimasukkan ke dalam persamaan menjadi seperti berikut:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{m}{x/2} = \frac{2m}{x} \quad (5)$$

Jika  $y = m/2$ , maka:

$$\alpha = \frac{(2)2m}{x} = \frac{4(2y)}{x} = \frac{8y}{x} \text{ rad} \quad (6)$$

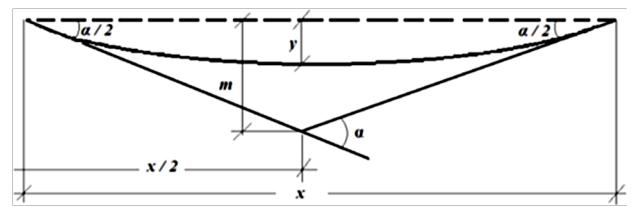
## 2.2 Kehilangan akibat slip pengangkuran (*slip anchorage*)

Kehilangan prategang akibat slip angkur terjadi sewaktu kawat dilepaskan dari mesin penarik dan ditahan baji pada angkur. Panjang atau besarnya slip tergantung tipe baji dan tegangan pada kawat tendon. Besarnya slip angkur tergantung pada sistem prategang yang digunakan, nilainya berkisar antara 0,125 - 0,375 inch (3,175 - 9,525 mm). Nilai slip angkur dapat diasumsikan sebesar 0,25 inch (6 mm) dalam perhitungan untuk pendekatan (C5.9.3.2.1 AASHTO-2017).

**Tabel 1. Koefisien gesek kelengkungan dan wobble**

| Jenis Tendon                           | Koefisien Wobble $K$ | Koefisien Kelengkungan $\mu$ |
|--|----------------------|------------------------------|
| Tendon di selubung material fleksibel  |                      |                              |
| Tendon kawat                           | 0,0010 – 0,0015      | 0,15 – 0,25                  |
| <i>Strand 7</i> kawat                  | 0,0005 – 0,0020      | 0,15 – 0,25                  |
| Batang mutu tinggi                     | 0,0001 – 0,0006      | 0,08 – 0,30                  |
| Tendon di saluran metal yang rigid     |                      |                              |
| <i>Strand 7</i> kawat                  | 0,0002               | 0,15 – 0,25                  |
| Tendon yang dilapisi <i>mastic</i>     |                      |                              |
| Tendon kawat dan <i>Strand 7</i> kawat | 0,0010 – 0,0020      | 0,05 – 0,15                  |
| Tendon yang dilumasi dahulu            |                      |                              |
| Tendon kawat dan <i>Strand 7</i> kawat | 0,0003 – 0,0020      | 0,05 – 0,15                  |

Sumber: Beton prategang suatu pendekatan mendasar edisi ketiga



**Gambar 2. Evaluasi pendekatan sudut pusat tendon**

Untuk menentukan kehilangan prategang akibat slip angkur dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\Delta f_A = \frac{\Delta A}{L} E_{ps} \quad (7)$$

Berdasarkan Manual Binamarga No. 021/BM/2011, kehilangan prategang akibat slip angkur dapat juga ditentukan dengan pendekatan rumus sebagai berikut:

$$\Delta f_A = \frac{2dx}{L} \quad (8)$$

$$x = \sqrt{\frac{E_{ps} \Delta AL}{d}} \quad (9)$$

Keterangan:

$\Delta_A$  = besarnya slip angkur (mm)

$L$  = panjang tendon (mm)

$E_{ps}$  = modulus elastisitas baja prategang (MPa)

$d$  = kehilangan akibat friksi pada jarak  $L$  dari titik penarikan ( $\Delta f_{FR}$ )

## 2.3 Kehilangan akibat perpendekan elastis beton (*elastic shortening*)

Beton menjadi lebih pendek bila gaya prategang diaplikasikan. Bersamaan dengan pemendekan itu tendon yang tertanam dalam beton tersebut kehilangan sebagian gaya yang dibawanya. Perpendekan elastis beton yang disebabkan bekerjanya gaya prategang initial  $P_i$  dapat dilihat pada **Gambar 3**.

Regangan yang terjadi adalah:

$$\varepsilon_{ES} = \frac{\Delta_{ES}}{L} = \frac{fc}{Ec} = \frac{Pi}{AcEc} \quad (10)$$

Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton dapat dihitung sebagai berikut:

$$\Delta f_{ES} = \varepsilon_{ES} E_s = \frac{P_i}{A_c E_{ci}} E_{ps} = \frac{P_i}{A_c} n = f_{cir} n \quad (11)$$

Rekomendasi ACI-ASCE untuk kehilangan elastis memperhitungkan pengaruh penarikan yang berturut-turut pada kehilangan elastis dengan mengubah **Persamaan 11** sebagai berikut:

$$\Delta f_{ES} = K_{es} f_{cir} n \quad (12)$$

Keterangan:

$f_{cir}$  = tegangan dalam beton pada level pusat tendon prategang

$n$  = nilai modular atau rasio  $E_{ps} / E_{ci}$

$K_{es} = 1,0$  untuk komponen struktur pratarik

$K_{es} = 0,5$  untuk komponen struktur pascatarik

Jika tendon mempunyai eksentrisitas terhadap pusat penampang dan berat sendiri beton ikut diperhitungkan, maka:

$$f_{cir} = -n \frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^-}{r^2} + \frac{MD e}{I_c}\right) \quad (13)$$

Catatan:

$f_{cir}$  bernilai (-) bila menyebabkan tekan dan bernilai (+) bila menyebabkan tarik.

## 2.4 Kehilangan akibat susut beton (shrinkage)

Bila tidak terbenam dalam air terus menerus (kondisi kelembaban 100%), beton akan kehilangan kebasahannya (*moisture*) dan berkurang volumenya. Proses ini disebut sebagai penyusutan beton. Besarnya penyusutan beton dapat bervariasi dari nol (terbenam dalam air) sampai 0,0008 untuk penampang tipis yang terbuat dari agregat dengan penyusutan tinggi dan tidak dilakukan *curing* dengan baik. Rumus umum kehilangan tegangan akibat susut berdasarkan PCI (*Prestressed Concrete Institute*) dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta f_{SH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{sh} E_{ps} (1 - 0,06^V) (100 - RH) \quad (14)$$

Keterangan:

$K_{sh}$  = koefisien susut tergantung waktu (**Tabel 2**)

$K_{sh} = 1,0$  untuk komponen struktur pratarik

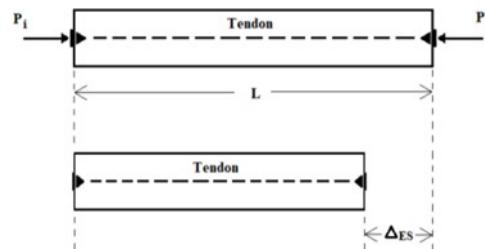
$E_{ps}$  = modulus elastisitas baja prategang (MPa).

$RH$  = kelembaban relatif suatu wilayah = 70 %

$V/S$  = rasio volume / luas permukaan (inch).

## 2.5 Kehilangan akibat rangkak beton (creep)

Rangkak merupakan proses pemampatan partikel-partikel penyusun beton akibat bekerjanya beban luar. Hal ini tergantung pada waktu (*time depent loss of*



Gambar 3. Perpendekan elastis beton (*elastic shortening*)

stress) yang diakibatkan proses penuaan dari beton selama pemakaian akibat rangkak sebesar:

$$\Delta f_{CR} = K_{CR} \frac{E_{ps}}{E_c} (f_{cir} - f_{csd}) \quad (15)$$

Untuk struktur dimana tidak terjadi lekatian yang baik antara tendon dan beton (*unbonded members*) besarnya kehilangan gaya prategang sebagai berikut:

$$\Delta f_{CR} = K_{CR} \frac{E_{ps}}{E_c} f_{cp} \quad (16)$$

Keterangan:

$K_{cr}$  = koefisien rangkak (2,0 untuk komponen struktur pratarik, 1,6 untuk komponen struktur pascatarik)

$E_{ps}$  = modulus elastisitas baja prategang (MPa)

$E_c$  = modulus elastisitas beton (MPa)

$f_{cir}$  = tegangan beton pada posisi/level baja prategang sesaat setelah transfer gaya prategang (MPa)

$f_{csd}$  = tegangan beton pada pusat berat tendon akibat beban mati (MPa)

$f_{cp}$  = tegangan tekan beton rata-rata pada pusat berat (MPa)

## 2.6 Kehilangan akibat relaksasi baja (relaxation)

Tendon *stress-relieved* mengalami kehilangan pada gaya prategang akibat perpanjangan konstan terhadap waktu. Besar pengurangan prategang bergantung tidak hanya pada durasi gaya prategang yang ditahan, melainkan juga pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang  $f_{pi}/f_{py}$ . Kehilangan pada setiap tahap waktu dapat didefinisikan pada persamaan berikut:

Untuk baja *stress-relieved*,

$$\Delta f_{RE} = f_{pi} \left( \frac{\log(t2) - \log(t1)}{10} \right) \left( \frac{J_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (17)$$

Untuk baja *low-relaxation*,

$$\Delta f_{RE} = f_{pi} \left( \frac{\log(t2) - \log(t1)}{40} \right) \left( \frac{J_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \quad (18)$$

Tabel 2. Nilai  $K_{sh}$  untuk komponen struktur pascatarik

| Waktu dari akhir perawatan basah hingga pemberian tegangan, hari | 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 |

Sumber: Beton prategang suatu pendekatan mendasar edisi ketiga

Tabel 3. Nilai  $K_{re}$  dan  $J$

| Jenis Tendon  | $K_{re}$ | $J$   |
|---|----------|-------|
| Strand atau kawat stress-relieved derajat 1860 MPa    | 138      | 0,15  |
| Strand atau kawat stress-relieved derajat 1720 MPa    | 128      | 0,14  |
| Kawat stress-relieved derajat 1655 MPa atau 1620 MPa  | 121      | 0,13  |
| Strand relaksasi rendah derajat 1860 MPa              | 35       | 0,040 |
| Kawat relaksasi rendah derajat 1720 MPa               | 32       | 0,037 |
| Kawat relaksasi rendah derajat 1655 MPa atau 1620 MPa | 30       | 0,035 |
| Batang stress-relieved derajat 1000 MPa atau 1100 MPa | 41       | 0,05  |

Sumber: Beton prategang suatu pendekatan mendasar edisi ketiga

Keterangan:

$$t_2, t_1 = \text{waktu akhir dan awal interval (jam)}$$

$$f_{pj} = \text{tegangan awal baja prategang (MPa)}$$

Kehilangan akibat relaksasi baja juga dapat dihitung menggunakan metode ACI-ASCE yang lebih sederhana. Persamaan ini menggunakan kontribusi terpisah antara perpendekan elastis, rangkak dan susut dalam evaluasi kehilangan yang diakibatkan relaksasi tegangan sebagai berikut:

$$\Delta f_{RE} = [K_{re} - J (\Delta f_{SH} + \Delta f_{CR} + \Delta f_{ES})] C$$

Keterangan:

$$K_{re} = \text{koefisien relaksasi (Tabel 2)}$$

$$J = \text{faktor waktu (Tabel 2)}$$

$$C = \text{faktor relaksasi yang tergantung pada jenis strand (Tabel 3)}$$

### 3. Metodologi Penelitian

#### 3.1 Data proyek

Data perencanaan diperoleh dari kontraktor pelaksana *Section Overpass STA 52+174* Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda, sebagai berikut:

1. Jenis Jembatan : Beton Prategang
2. Jenis Girder : *PC I Girder*
3. Koordinat : 515674,72 N, 9913248,74 E
4. Panjang Jembatan : 85,2 m
5. Lebar Jembatan : 10,0 m
6. Lebar Jalur : 7,00 m
7. Lebar Trotoar : 1,50 m
8. Jarak Girder : 1,80 m

#### 3.2 Objek penelitian

Objek yang diteliti pada penelitian ini adalah *PC I girder* yang digunakan pada struktur jembatan tersebut yang terbagi menjadi 2 tipe *PC I Girder* dengan panjang 25,80 m, dan 16,80 m dengan rincian sebagai berikut:

##### 1. Concrete

$$\text{Compressive Str. (Service)}, f'_c = 43,00 \text{ MPa}$$

$$\text{Compressive Str. (Stressing)}, f_{ci} = 34,00 \text{ MPa}$$

##### 2. Prestressing Steel

$$\text{Ø PC Strand} = /2" (12,7 \text{ mm})$$

Tabel 4. Nilai C

| $f_{pj} / f_{pu}$ | Kawat atau strand stress-relieved | Kawat atau strand relaksasi rendah atau batang stress-relieved |
|-------------------|-----------------------------------|--|
| 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   |

Sumber: Beton prategang suatu pendekatan mendasar edisi ketiga

Spec.PC Strand = ASTM-A416 Grade 270 (Low Relaxation)

UTS = 18700 kgf

Jacking Force = 75% UTS

##### 3. Cast in Site Slab

Compressive Strength,  $f'_c = 29,00 \text{ MPa}$

Dimensi *PC I girder* pada masing-masing *span* pada penelitian ini dijabarkan pada **Gambar 5**.

#### 3.3 Tahapan penelitian

Tahapan pada penelitian ini adalah:

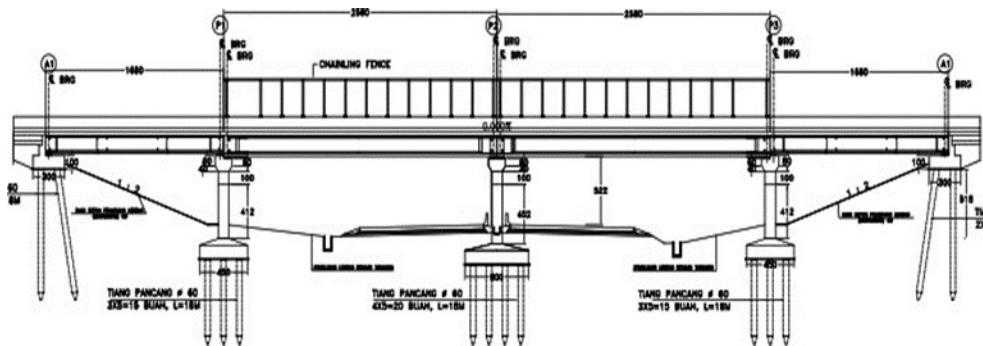
1. Menentukan data struktur jembatan dan profil girder.
2. Menghitung analisis penampang girder
3. Menganalisa pembebanan pada jembatan sesuai SNI 1725:2016.



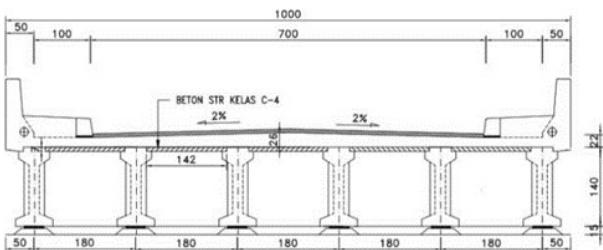
Gambar 4. Section overpass STA 52+174



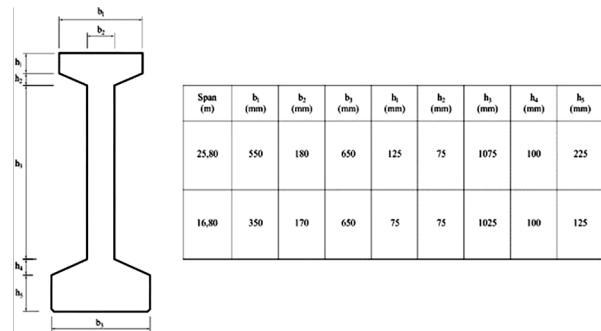
Gambar 5. Penampakan section overpass STA 52+174



Gambar 6. Design drawing overpass STA 52+174



Gambar 7. Potongan overpass STA 52+174



Gambar 8. Dimensi PC I girder overpass STA 52+174

4. Menghitung kehilangan prategang akibat metode *single stressing* dan metode *double stressing*.
5. Menghitung kontrol tegangan dan lendutan yang terjadi pada masing-masing girder.
6. Menyimpulkan perbandingan kehilangan prategang dengan metode *single stressing* dengan metode *double stressing*.
7. Menyimpulkan pengaruh panjang bentang yang ditinjau terhadap kehilangan prategang yang terjadi.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

##### 4.1 Review / preliminary design PC I girder

Perhitungan ini dilakukan sebagai kontrol dimensi *PC I girder* yang digunakan memenuhi syarat minimum yang ditetapkan. Perkiraan dimensi diambil menggunakan Persamaan 1.

Bentang *span* 25,80 m ( $h = 1,60$  m)

$$h = \frac{1}{20} \cdot l \leq 1,60$$

$$h = \frac{1}{20} \cdot 25,80 = 1,29 < 1,60 \dots \dots (\text{OK})$$

Bentang *span* 16,80 m ( $h = 1,40$  m)

$$h = \frac{1}{20} \cdot l \leq 1,40$$

$$h = \frac{1}{20} \cdot 16,80 = 0,84 < 1,40 \dots \dots (\text{OK})$$

Dari perhitungan pendekatan di atas dapat diambil kesimpulan bahwa tinggi aktual *PC I girder* yang digunakan memenuhi syarat minimum yang ditetapkan.

Tabel 5. Analisa penampang

| Uraian           | PC I Girder 25,80 m |               | PC I Girder 16,80 m |               |
|------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|
|                  | Seb. Komposit       | Set. Komposit | Seb. Komposit       | Set. Komposit |
| $\Sigma A (m^2)$ | 0,477               | 0,846         | 0,342               | 0,708         |
| $y_t (m)$        | 0,889               | 0,715         | 0,812               | 0,592         |
| $y_b (m)$        | 0,711               | 1,175         | 0,588               | 1,098         |
| $I_x (m^4)$      | 0,146               | 0,383         | 0,074               | 0,248         |
| $W_t (m^3)$      | 0,164               | 0,535         | 0,092               | 0,420         |
| $W'_t (m^3)$     | -                   | 0,773         | -                   | 0,668         |
| $W_b (m^3)$      | 0,205               | 0,326         | 0,127               | 0,226         |

Tabel 6. Kombinasi pembebanan

| Kombinasi Pembebaan | Momen Ultimit (kNm) |              |
|---------------------|---------------------|--------------|
|                     | Span 25,80 m        | Span 16,80 m |
| Kuat I              | 7253,01             | 3352,25      |
| Kuat II             | 6366,41             | 2888,72      |
| Kuat III            | 3814,35             | 1425,21      |
| Kuat IV             | 3263,28             | 1266,36      |
| Kuat V              | 3545,68             | 1364,73      |
| Ekstrem I           | 3492,06             | 1351,30      |
| Ekstrem II          | 4371,54             | 1845,78      |
| Daya Layan I        | 4894,01             | 2184,59      |
| Daya Layan II       | 5315,53             | 2444,90      |
| Daya Layan III      | 4207,67             | 1865,80      |
| Daya Layan IV       | 2709,59             | 1017,84      |
| Fatik               | 1608,28             | 817,61       |

Tabel 7. Jarak tendon

| No. Tendon | Span 25,80 m          |                | Span 16,80 m |                       |
|------------|-----------------------|----------------|--------------|-----------------------|
|            | Tengah Bentang<br>(m) | Tumpuan<br>(m) | No. Tendon   | Tengah Bentang<br>(m) |
| 1          | 0,100                 | 1,223          | 1            | 0,100                 |
| 2          | 0,100                 | 0,711          | 2            | 0,100                 |
| 3          | 0,100                 | 0,200          | 3            | 0,100                 |

#### 4.2 Analisa penampang

Analisis penampang dibutuhkan untuk mengetahui luas, titik berat, momen inersia dan *modulus section* pada balok

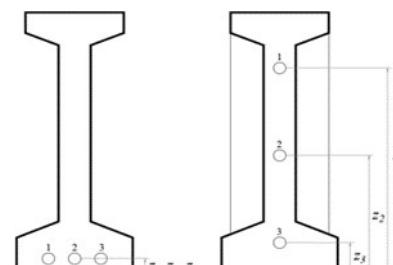
*girder* sebelum komposit dan setelah komposit. Analisa penampang ditampilkan pada **Tabel 5**.

#### 4.3 Analisa pembebanan

Pada analisa pembebanan ini terdiri dari analisa beban mati, beban hidup, beban lingkungan dan menghitung momen yang bekerja. Selanjutnya dilakukan perhitungan momen ultimit yang terjadi akibat kombinasi pembebanan. Analisa pembebanan ditampilkan pada **Tabel 6**.

#### 4.4 Penentuan posisi tendon

Penentuan posisi dan jarak tendon pada masing-masing *girder* ditampilkan pada **Tabel 7**.



Gambar 9. Posisi tendon

#### 4.5 Kehilangan prategang

Kehilangan prategang total yang terdiri dari kehilangan prategang langsung dan kehilangan prategang akibat pengaruh waktu. Perhitungan kehilangan prategang total pada masing-masing bentang dengan metode penarikan satu arah (*single stressing*) ditampilkan pada **Tabel 8** dan **Tabel 9**.

**Tabel 8.** Kehilangan prategang total (metode *single stressing*) pada span 25,80 m

| Titik Tinjauan | $L_x$<br>(m) | Immediate Losses         |                       |                          | Time-Dependent Losses    |                          |                          | $\Delta f_{TOT}$<br>(MPa) | $\Delta f_{TOT}$<br>(%) |
|----------------|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                |              | $\Delta f_{FR}$<br>(MPa) | $\Delta f_A$<br>(MPa) | $\Delta f_{ES}$<br>(MPa) | $\Delta f_{SH}$<br>(MPa) | $\Delta f_{CR}$<br>(MPa) | $\Delta f_{RE}$<br>(MPa) |                           |                         |
| 0              | 0,00         | 0,00                     | 73,34                 | 17,37                    | 27,47                    | 55,57                    | 30,98                    | 204,74                    | 14,68%                  |
| 1              | 5,00         | 39,47                    | 0,00                  | 20,89                    | 27,47                    | 41,89                    | 31,39                    | 161,11                    | 11,55%                  |
| 2              | 10,00        | 89,67                    | 0,00                  | 25,29                    | 27,47                    | 24,78                    | 31,90                    | 199,12                    | 14,27%                  |
| 3              | 12,50        | 132,68                   | 0,00                  | 25,97                    | 27,47                    | 22,16                    | 31,98                    | 240,26                    | 17,22%                  |
| 4              | 15,00        | 172,42                   | 0,00                  | 25,29                    | 27,47                    | 24,78                    | 31,90                    | 281,86                    | 20,21%                  |
| 5              | 20,00        | 205,92                   | 0,00                  | 20,89                    | 27,47                    | 41,89                    | 31,39                    | 327,56                    | 23,48%                  |
| 6              | 25,00        | 217,75                   | 0,00                  | 17,37                    | 27,47                    | 55,57                    | 30,98                    | 349,15                    | 25,03%                  |

**Tabel 9.** Kehilangan prategang total (metode *single stressing*) pada span 16,80 m

| Titik Tinjauan | $L_x$<br>(m) | Immediate Losses         |                       |                          | Time-Dependent Losses    |                          |                          | $\Delta f_{TOT}$<br>(MPa) | $\Delta f_{TOT}$<br>(%) |
|----------------|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                |              | $\Delta f_{FR}$<br>(MPa) | $\Delta f_A$<br>(MPa) | $\Delta f_{ES}$<br>(MPa) | $\Delta f_{SH}$<br>(MPa) | $\Delta f_{CR}$<br>(MPa) | $\Delta f_{RE}$<br>(MPa) |                           |                         |
| 0              | 0,00         | 0,00                     | 114,59                | 24,22                    | 27,57                    | 77,51                    | 29,83                    | 273,73                    | 19,62%                  |
| 1              | 3,00         | 36,43                    | 0,00                  | 31,92                    | 27,57                    | 87,91                    | 29,10                    | 212,94                    | 15,26%                  |
| 2              | 6,00         | 84,97                    | 0,00                  | 42,45                    | 27,57                    | 102,13                   | 28,11                    | 285,23                    | 20,45%                  |
| 3              | 8,00         | 130,54                   | 0,00                  | 44,96                    | 27,57                    | 105,52                   | 27,88                    | 336,46                    | 24,12%                  |
| 4              | 10,00        | 171,74                   | 0,00                  | 42,45                    | 27,57                    | 102,13                   | 28,11                    | 372,00                    | 26,67%                  |
| 5              | 13,00        | 202,65                   | 0,00                  | 31,92                    | 27,57                    | 87,91                    | 29,10                    | 379,16                    | 27,18%                  |
| 6              | 16,00        | 211,56                   | 0,00                  | 24,22                    | 27,57                    | 77,51                    | 29,83                    | 370,70                    | 26,57%                  |

**Tabel 10.** Kehilangan prategang total (metode *double stressing*) pada span 25,80 m

| Titik Tinjauan | $L_x$<br>(m) | Immediate Losses         |                       |                          | Time-Dependent Losses    |                          |                          | $\Delta f_{TOT}$<br>(MPa) | $\Delta f_{TOT}$<br>(%) |
|----------------|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                |              | $\Delta f_{FR}$<br>(MPa) | $\Delta f_A$<br>(MPa) | $\Delta f_{ES}$<br>(MPa) | $\Delta f_{SH}$<br>(MPa) | $\Delta f_{CR}$<br>(MPa) | $\Delta f_{RE}$<br>(MPa) |                           |                         |
| 0              | 0,00         | 0,00                     | 73,34                 | 17,37                    | 27,47                    | 55,57                    | 30,98                    | 204,74                    | 14,68%                  |
| 1              | 5,00         | 39,47                    | 0,00                  | 20,89                    | 27,47                    | 41,89                    | 31,39                    | 161,11                    | 11,55%                  |
| 2              | 10,00        | 89,67                    | 0,00                  | 25,29                    | 27,47                    | 24,78                    | 31,90                    | 199,12                    | 14,27%                  |
| 3              | 12,50        | 132,68                   | 0,00                  | 25,97                    | 27,47                    | 22,16                    | 31,98                    | 240,26                    | 17,22%                  |
| 4              | 15,00        | 89,67                    | 0,00                  | 25,29                    | 27,47                    | 24,78                    | 31,90                    | 199,12                    | 14,27%                  |
| 5              | 20,00        | 39,47                    | 0,00                  | 20,89                    | 27,47                    | 41,89                    | 31,39                    | 161,11                    | 11,55%                  |
| 6              | 25,00        | 0,00                     | 73,34                 | 17,37                    | 27,47                    | 55,57                    | 30,98                    | 204,74                    | 14,68%                  |

**Tabel 11.** Kehilangan prategang total (metode *double stressing*) pada span 16,80 m

| Titik Tinjauan | $L_x$<br>(m) | Immediate Losses         |                       |                          | Time-Dependent Losses    |                          |                          | $\Delta f_{TOT}$<br>(MPa) | $\Delta f_{TOT}$<br>(%) |
|----------------|--------------|--------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                |              | $\Delta f_{FR}$<br>(MPa) | $\Delta f_A$<br>(MPa) | $\Delta f_{ES}$<br>(MPa) | $\Delta f_{SH}$<br>(MPa) | $\Delta f_{CR}$<br>(MPa) | $\Delta f_{RE}$<br>(MPa) |                           |                         |
| 0              | 0,00         | 0,00                     | 114,59                | 24,22                    | 27,57                    | 77,51                    | 29,83                    | 273,73                    | 19,62%                  |
| 1              | 3,00         | 36,43                    | 0,00                  | 31,92                    | 27,57                    | 87,91                    | 29,10                    | 212,94                    | 15,26%                  |
| 2              | 6,00         | 84,97                    | 0,00                  | 42,45                    | 27,57                    | 102,13                   | 28,11                    | 285,23                    | 20,45%                  |
| 3              | 8,00         | 130,54                   | 0,00                  | 44,96                    | 27,57                    | 105,52                   | 27,88                    | 336,46                    | 24,12%                  |
| 4              | 10,00        | 84,97                    | 0,00                  | 42,45                    | 27,57                    | 102,13                   | 28,11                    | 285,23                    | 20,45%                  |
| 5              | 13,00        | 36,43                    | 0,00                  | 31,92                    | 27,57                    | 87,91                    | 29,10                    | 212,94                    | 15,26%                  |
| 6              | 16,00        | 0,00                     | 114,59                | 24,22                    | 27,57                    | 77,51                    | 29,83                    | 273,73                    | 19,62%                  |

Berdasarkan **Tabel 8** dan **Tabel 9** diketahui bahwa kehilangan prategang total dengan metode penarikan satu arah (*single stressing*) untuk span 25,80 m dan 16,80 m nilainya turun pada titik tinjauan ke-1 yaitu pada jarak tinjauan 5,00 m dan 3,00 m. Selanjutnya nilai kehilangan prategang total meningkat sampai titik tinjauan ke-6 yaitu sebesar 25,03% pada jarak tinjauan

25,00 m, sedangkan pada span 16,80 m kehilangan prategang total mengalami penurunan pada tinjauan ke-6 yaitu sebesar 26,57% pada jarak tinjauan 16,00 m. Perhitungan kehilangan prategang total pada masing-masing bentang dengan metode penarikan dua arah (*double stressing*) ditampilkan pada **Tabel 10** dan **11**.

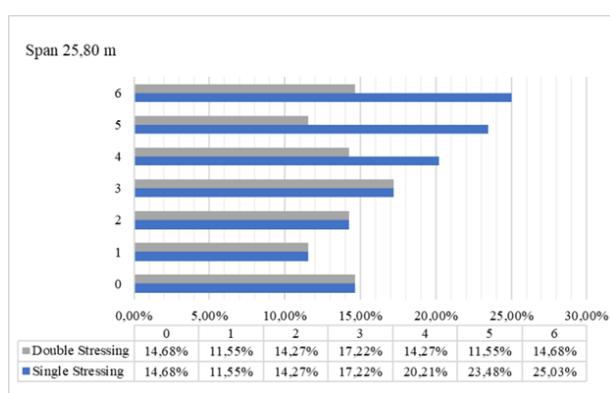
Berdasarkan **Tabel 10** dan **Tabel 11** diketahui bahwa kehilangan prategang total dengan metode penarikan dua arah (*double stressing*) untuk *span* 25,80 m dan 16,80 m nilainya akan turun pada titik tinjauan ke-1 yaitu pada jarak tinjauan 5,00 m dan 3,00 m. Nilai kehilangan prategang total meningkat hingga mencapai nilai kehilangan prategang terbesar yang terletak pada titik tinjauan ke-3 di tengah bentang yaitu sebesar 17,22% pada jarak tinjauan 12,50 m untuk *span* 25,80 m dan sebesar 24,12% pada jarak tinjauan 8,00 m untuk *span* 16,80 m.

Berdasarkan tabel tersebut, metode *stressing* pada beton prategang pascatarik berpengaruh pada kehilangan prategang, khususnya pada kehilangan prategang akibat gesekan kabel prategang dan slip pengangkuran yang memiliki pengaruh paling besar terhadap metode *stressing* yang digunakan. Sehingga dapat disimpulkan metode penarikan satu arah (*single stressing*) menghasilkan kehilangan prategang lebih besar daripada

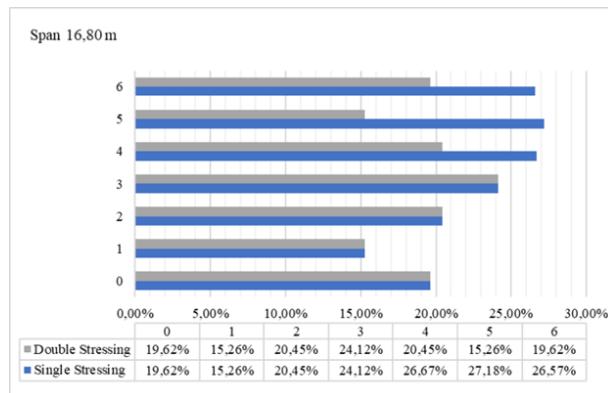
metode penarikan dua arah (*double stressing*). Hal tersebut berlaku untuk semua bentang yang ditinjau.

Perbandingan besarnya kehilangan prategang total dengan metode penarikan satu arah (*single stressing*) dan metode penarikan dua arah (*double stressing*) pada masing-masing bentang ditampilkan pada **Gambar 10** dan **Gambar 11**.

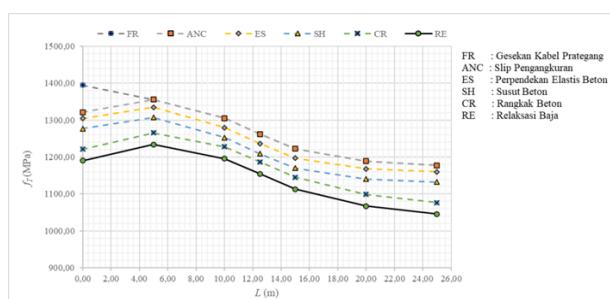
Pada **Gambar 10** dan **Gambar 11** diperlihatkan kehilangan prategang total pada metode penarikan satu arah (*single stressing*) dan metode penarikan dua arah (*double stressing*) memiliki nilai yang sama pada titik tinjauan ke-0 hingga titik tinjauan ke-3. Selanjutnya perbedaan terlihat pada titik tinjauan ke-4 hingga titik tinjauan ke-6. Untuk semua metode penarikan terlihat nilai kehilangan prategang total turun pada titik tinjauan ke-1 yaitu pada jarak tinjauan 5,00 m dan 3,00 m.



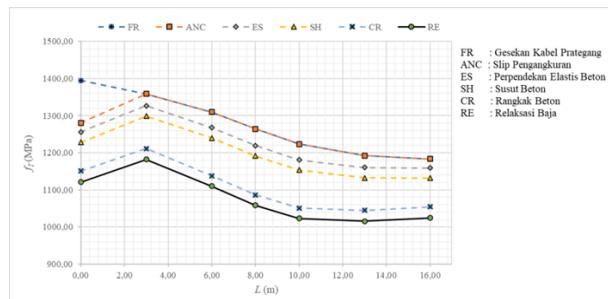
**Gambar 10.** Perbandingan kehilangan prategang total pada *span* 25,80 m



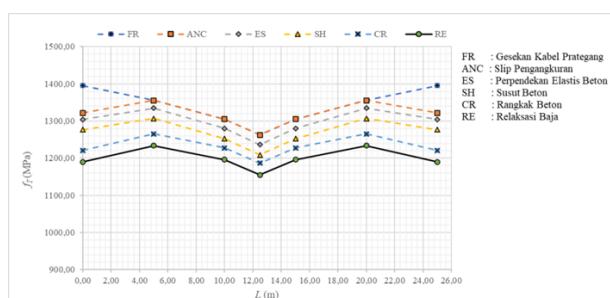
**Gambar 11.** Perbandingan kehilangan prategang total pada *span* 16,80 m



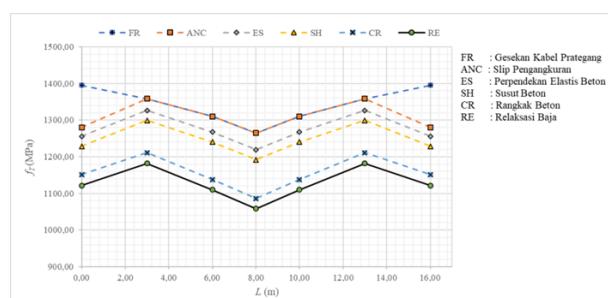
**Gambar 12.** Kehilangan prategang (*single stressing*) pada *span* 25,80 m



**Gambar 13.** Kehilangan prategang (*single stressing*) pada *span* 16,80 m



**Gambar 14.** Kehilangan prategang (*double stressing*) pada *span* 25,80 m



**Gambar 15.** Kehilangan prategang (*double stressing*) pada *span* 16,80 m

Pada metode penarikan satu arah (*single stressing*), pada *span* 25,80 m kehilangan prategang total mengalami peningkatan dari titik tinjauan ke-1 sampai titik tinjauan ke-6 yaitu sebesar 25,03% pada jarak tinjauan 25,00 m, sedangkan pada *span* 16,80 m kehilangan prategang total terbesar berada pada titik tinjauan ke-5 yaitu sebesar 27,18% pada jarak tinjauan 13,00 m, lalu mengalami penurunan pada tinjauan ke-6 yaitu sebesar 26,57% pada jarak tinjauan 16,00 m.

Pada metode penarikan dua arah (*double stressing*), kehilangan prategang total meningkat dari titik tinjauan ke-1 hingga mencapai nilai kehilangan prategang terbesar yang terletak pada titik tinjauan ke-3 di tengah bentang yaitu sebesar 17,22% pada jarak tinjauan 12,50 m untuk *span* 25,80 m dan sebesar 24,12% pada jarak tinjauan 8,00 m untuk *span* 16,80 m. Dikarenakan penarikan dilakukan pada kedua sisi penampang beton prategang dan diberikan gaya *jacking* yang sama maka nilai kehilangan prategang total pada titik tinjauan ke-0 bernilai sama dengan titik tinjauan ke-6, pada titik tinjauan ke-1 bernilai sama dengan titik tinjauan ke-5, dan pada titik tinjauan ke-2 bernilai sama dengan titik tinjauan ke-4.

Besarnya kehilangan prategang total akibat semua faktor kehilangan prategang dengan metode penarikan

satu arah (*single stressing*) dan metode penarikan dua arah (*double stressing*) pada masing-masing bentang ditampilkan pada Gambar 12 sampai dengan Gambar 15.

Pada metode penarikan dua arah (*double stressing*) di setiap sisi penampang prategang diberikan gaya *jacking* yang sama dan ditarik bersamaan sehingga gaya bergerak kearah sisi kanan dan kiri beton prategang dengan pusat pada tengah bentang. Hal tersebut menyebabkan kehilangan prategang yang terjadi pada metode penarikan dua arah (*double stressing*) lebih kecil dibandingkan dengan kehilangan prategang yang terjadi pada metode penarikan satu arah (*single stressing*).

#### 4.6 Kontrol tegangan

Tegangan yang terjadi pada *girder* terdiri dari 4 tahap, yaitu kondisi awal sebelum kehilangan gaya prategang, sesaat setelah *transfer* gaya prategang, setelah plat lantai kendaraan selesai dicor, dan setelah plat lantai dan *girder* menjadi komposit.

Tegangan izin tekan pada kondisi sesaat setelah transfer gaya prategang,

$$f_{ci} = -0,60 \quad f'_{ci} = -0,60 \cdot 34,00 = -20,40 \text{ Mpa}$$

Tabel 12. Kontrol tegangan

| Uraian  | Span 25,80 m | Check           | Span 16,80 m | Check           |
|---|--------------|-----------------|--------------|-----------------|
| <b>Kondisi Awal</b>                           |              |                 |              |                 |
| $f_t$ (MPa)                                   | 0,98         | < $f_{ti}$ (OK) | 0,53         | < $f_{ti}$ (OK) |
| $f_b$ (MPa)                                   | -15,93       | > $f_{ci}$ (OK) | -7,85        | > $f_{ci}$ (OK) |
| <b>Sesaat setelah transfer gaya prategang</b> |              |                 |              |                 |
| $f_t$ (MPa)                                   | -0,12        | > $f_{cs}$ (OK) | -0,06        | > $f_{cs}$ (OK) |
| $f_b$ (MPa)                                   | -12,50       | > $f_{cs}$ (OK) | -6,16        | > $f_{cs}$ (OK) |
| <b>Setelah plat lantai dicor</b>              |              |                 |              |                 |
| $f_t$ (MPa)                                   | -4,93        | > $f_{cs}$ (OK) | -3,72        | > $f_{cs}$ (OK) |
| $f_b$ (MPa)                                   | -8,65        | > $f_{cs}$ (OK) | -3,51        | > $f_{cs}$ (OK) |
| <b>Plat dan girder menjadi komposit</b>       |              |                 |              |                 |
| $f_t$ (MPa)                                   | -0,70        | > $f_{cs}$ (OK) | -0,42        | > $f_{cs}$ (OK) |
| $f_t$ (MPa)                                   | -1,58        | > $f_{cs}$ (OK) | -0,83        | > $f_{cs}$ (OK) |
| $f_b$ (MPa)                                   | -8,26        | > $f_{cs}$ (OK) | -3,57        | > $f_{cs}$ (OK) |

Tabel 13. Kontrol momen nominal

| Kombinasi Pembebatan | Span 25,80 m | Check | Span 16,80 m | Check |
|----------------------|--------------|-------|--------------|-------|
| Kuat I               | 4017,09      | Aman  | 2276,16      | Aman  |
| Kuat II              | 3130,48      | Aman  | 1812,63      | Aman  |
| Kuat III             | 578,43       | Aman  | 349,12       | Aman  |
| Kuat IV              | 27,36        | Aman  | 190,27       | Aman  |
| Kuat V               | 309,76       | Aman  | 288,64       | Aman  |
| Ekstrem I            | 256,14       | Aman  | 275,21       | Aman  |
| Ekstrem II           | 1135,62      | Aman  | 769,69       | Aman  |
| Daya Layan I         | 1658,09      | Aman  | 1108,50      | Aman  |
| Daya Layan II        | 2079,61      | Aman  | 1368,81      | Aman  |
| Daya Layan III       | 971,75       | Aman  | 789,71       | Aman  |
| Daya Layan IV        | -526,33      | Aman  | -58,25       | Aman  |
| Fatik                | -1627,65     | Aman  | -258,48      | Aman  |

Tabel 14. Kontrol lendutan

| Kombinasi Pembebanan | $\delta_{tot}$ (m) |       |              |       |
|----------------------|--------------------|-------|--------------|-------|
|                      | Span 25,80 m       | Check | Span 16,80 m | Check |
| Kuat I               | 0,0322             | Aman  | 0,0075       | Aman  |
| Kuat II              | 0,0250             | Aman  | 0,0059       | Aman  |
| Kuat III             | 0,0046             | Aman  | 0,0011       | Aman  |
| Kuat IV              | -0,0003            | Aman  | 0,0005       | Aman  |
| Kuat V               | 0,0023             | Aman  | 0,0008       | Aman  |
| Ekstrem I            | 0,0018             | Aman  | 0,0008       | Aman  |
| Ekstrem II           | 0,0088             | Aman  | 0,0025       | Aman  |
| Daya Layan I         | 0,0126             | Aman  | 0,0036       | Aman  |
| Daya Layan II        | 0,0158             | Aman  | 0,0044       | Aman  |
| Daya Layan III       | 0,0068             | Aman  | 0,0025       | Aman  |
| Daya Layan IV        | -0,0052            | Aman  | -0,0003      | Aman  |
| Fatik                | -0,0155            | Aman  | -0,0008      | Aman  |

Tegangan izin tarik pada kondisi sesaat setelah transfer gaya prategang

$$f_{ti} = 0,25 \sqrt{f'_{ci}} = 0,25\sqrt{34,00} = 1,46 \text{ MPa}$$

Tegangan izin tekan saat beban layan pada kondisi prategang + beban tetap,

$$f_{cs} = -0,45 f'_c = -0,45 \cdot 43,00 = -19,35 \text{ MPa}$$

Tegangan izin tekan saat beban layan pada kondisi prategang + beban total,

$$f_{cs} = -0,60 f'_c = -0,60 \cdot 43,00 = -25,80 \text{ MPa}$$

Tegangan izin tarik saat beban layan,

$$f_{is} = 0,62 \sqrt{f'_{ci}} = 0,62\sqrt{34,00} = 4,07 \text{ MPa}$$

$$f_{is} = 1,00 \sqrt{f'_{ci}} = 1,00\sqrt{34,00} = 6,56 \text{ Mpa}$$

#### 4.7 Kontrol momen nominal

Perhitungan momen nominal dilakukan untuk menganalisa kemampuan penampang struktur dalam menerima beban-beban yang bekerja akibat kombinasi pembebanan yang disyaratkan.

Momen nominal,

$$\text{Span } 25,80 \text{ m}, \varnothing M_n = 12722,69 \text{ kNm}$$

$$\text{Span } 16,80 \text{ m}, \varnothing M_n = 11106,93 \text{ kNm}$$

Syarat:  $\Sigma M_u \leq \varnothing M_n$

#### 4.8 Kontrol lendutan

Lendutan yang terjadi pada balok komposit diakibatkan oleh beban-beban yang bekerja pada kondisi *service*. Lendutan yang terjadi pada balok komposit akibat beban yang bekerja dimasukan ke dalam kombinasi pembebanan untuk mendapatkan lendutan *ultimit*.

Lendutan maksimal yang terjadi,

$$\text{Span } 25,80 \text{ m}, \delta_{maks} = 0,108 \text{ m}$$

$$\text{Span } 16,80 \text{ m}, \delta_{maks} = 0,070 \text{ m}$$

Syarat:  $\delta_{tot} \leq \delta_{maks}$

#### 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada analisa perhitungan kehilangan prategang akibat metode *stressing* pada variasi bentang PCI girder 25,80 m dan 16,80 m, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Kehilangan prategang akibat penarikan satu arah (*single stressing*) pada PCI girder bentang 25,80 m adalah sebesar 25,03 % sedangkan pada PCI girder bentang 16,80 m adalah 27,18%.
2. Kehilangan prategang akibat penarikan dua arah (*double stressing*) pada PCI girder bentang 25,80 m adalah sebesar 17,22 % sedangkan pada PCI girder bentang 16,80 m adalah 24,12%.
3. Pada metode penarikan dua arah (*double stressing*) di setiap sisi penampang prategang diberikan gaya jacking yang sama dan ditarik bersamaan sehingga gaya bergerak kearah sisi kanan dan kiri beton prategang dengan pusat pada tengah bentang. Hal tersebut menyebabkan kehilangan prategang yang terjadi pada metode penarikan dua arah (*double stressing*) lebih kecil dibandingkan dengan kehilangan prategang yang terjadi pada metode penarikan satu arah (*single stressing*).
4. Kehilangan gaya prategang pada PCI girder bentang 25,8 m nilainya lebih kecil dibandingkan kehilangan gaya prategang pada PCI girder bentang 16,8 m. Hal ini dikarenakan mutu dan jumlah tendon yang digunakan mempengaruhi nilai kehilangan prategang akibat perpendekan elastis beton. Mutu dan jumlah tendon dapat dikurangi untuk menghasilkan kehilangan gaya prategang yang lebih kecil.

#### Daftar Pustaka

AASHTO (2012) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.

- Binamarga (2011) *Manual Konstruksi dan Bangunan 021/BM/2011*, Direktorat Jenderal Bina Marga, Jakarta BSN (2004) RSNI T-12-2004 Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta. BSN (2016) SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN (2016) SNI 2833:2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- BSN (2019) SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD), Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- Budiadi, A. (2008) *Desain Praktis Beton Prategang*, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- Dolan, C. W., dan Hamilton, H. R. T. (2018) *Prestressed Concrete Building, Design, and Construction*, Springer, Switzerland.
- Hong, S., (2017) *Effect of Prestress Levels and Jacking Methods on Friction Losses in Curved Prestressed Tendons*, Sungkyunkwan University, Gyeonggi.
- Lin, T. Y., dan Burns H. (1988) *Desain Struktur Beton Prategang*, (Edisi Ketiga, Jilid 1), Erlangga, Jakarta.
- Nawy, E. G. (2001) *Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar*, (Edisi Ketiga, Jilid 1), Erlangga, Jakarta.
- PCI (2010) *PCI Design Handbook Precast and Prestressed Concrete*, (Seventh Edition), Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago.
- Rahmawati, C., Zainuddin, Safwanda, N., dan Is S. (2016) *Analysing the Route of PCI Girder-Type Prestressed Concrete Tendons*, International Journal of Science and Research (IJSR), 1553-1559.
- Raju, N. K. (1989) *Beton Prategang*, (Edisi Kedua), Erlangga, Jakarta.
- Rizkia, S. R., Suyadi, dan Husni, H. R. (2017) Analisis Perbandingan Kehilangan Prategang akibat Metode Stressing Satu Arah dan Dua Arah pada Jembatan Beton Prategang, JRSDD, 5(3), 1-12.
- Sari, Y. I. (2018) *Re-Design Struktur PCI Girder Pada Overpass Kranggan (STA. 72+237) Proyek Jalan Tol Semarang – Solo Ruas Salatiga – Kartasura, Sekolah Tinggi Teknik-PLN, Jakarta.*
- Sudarmono (2016) *Struktur Beton Prategang Teori dan Aplikasi*, (Edisi Kesepuluh), Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang.