

## BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 2.1. UMUM

Pada penelitian ini akan didesain gelagar dengan menggunakan konstruksi *box girder prestress* struktur *simple beam* dengan bentang gelagar 50 m. Penelitian ini mencakup perhitungan struktur atas berupa gelagar *box girder*. Agar penelitian dapat dilaksanakan, maka diperlukan analisis berdasarkan data yang tersedia sesuai dengan struktur yang diteliti.

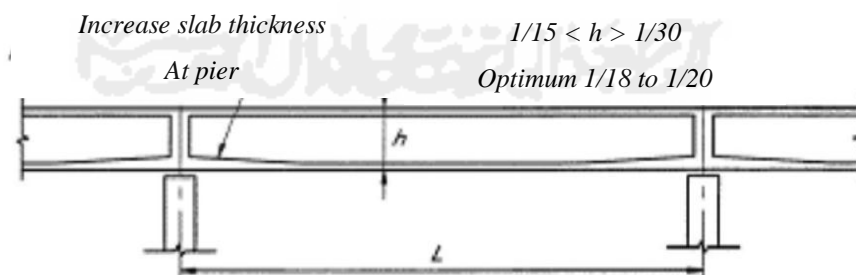
### 5.2. PERENCANAAN *BOX GIRDER PRESTRESSED*

#### 5.2.1. Perhitungan Penampang Balok Prategang

Penampang yang digunakan pada balok prategang adalah penampang trapesium. Tahapan perhitungan penampang balok prategang tipe *box girder* adalah sebagai berikut ini.

##### 1. Mencari Tinggi Balok

Pada sistem *box girder* untuk menentukan dimensi *box girder* menurut AASHTO, *Guide Specification for Design and Construction of Segmental, second edition 1999* digunakan perhitungan seperti pada Gambar 5.1.



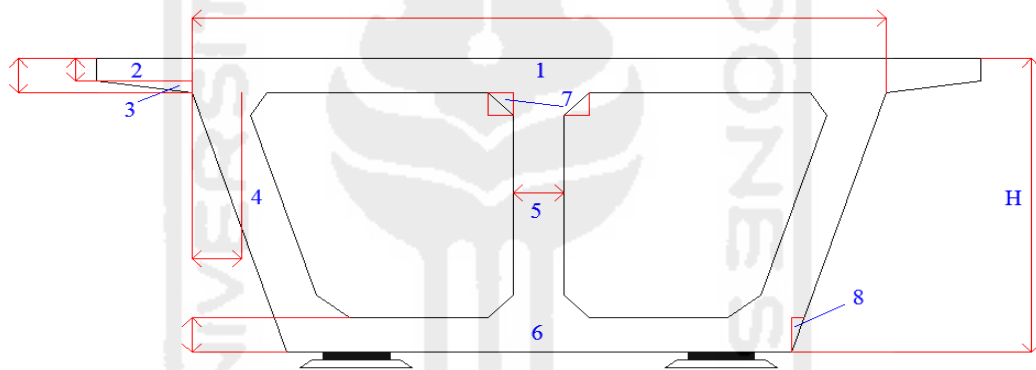
Gambar 5.1 Penampang balok prategang

(Sumber: Wiyadi, 2010 )

- Bentang Jembatan = 50 m
- Tinggi minimum =  $1/30 \cdot 50 = 1,7$  m
- Tinggi maksimum =  $1/15 \cdot 50 = 3,3$  m
- Digunakan tinggi balok prategang ( $h$ ) = 2 m ; 2,2 m ; 2,4 m ; 2,6 m sebagai tinggi acuan pada penelitian ini.

## 2. Penentuan Propertis Penampang *Box Girder*

Berikut pembagian luas penampang pada *box girder* seperti pada Gambar 5.2, contoh rekap analisa perhitungan penampang *box girder* menggunakan variasi tinggi balok dapat dilihat pada Tabel 5.1 - Tabel 5.4.



Gambar 5.2 Penampang properties balok *box girder*

Tabel 5.1 Propertis penampang *box girder*  $h = 2,6$  m

No	Dimensi		Shape Factor	Jml Tampang	Luas Tampang (m <sup>2</sup> )	Jarak thd alas (m)	Statis Momen (A*y)	Inersia Momen (A*y <sup>2</sup> )	Inersia Momen (I <sub>o</sub> )
	L (m)	T (m)							
1	5,5	0,3	1	1	1,65	2,45	4,04	9,90	0,01
2	0,75	0,2	1	2	0,30	2,50	0,75	1,88	0,00
3	0,75	0,1	0,5	2	0,08	2,35	0,18	0,41	0,00
4	2	0,4	1	2	1,60	1,30	2,08	2,70	0,02
5	2	0,4	1	1	0,80	1,30	1,04	1,35	0,01
6	4	0,3	1	1	1,20	0,15	0,18	0,03	0,01
7a	0,2	0,2	0,5	4	0,08	2,17	0,17	0,38	0,00
7b	0,2	0,2	0,5	4	0,08	0,37	0,03	0,01	0,00
8	0,3	0,15	0,5	2	0,05	0,20	0,01	0,00	0,00
Jumlah					5,83		8,48	16,66	0,06

Tabel 5.2 Propertis penampang *box girder*  $h = 2,4$  m

No	Dimensi		Shape Factor	Jml Tampang	Luas Tampang (m <sup>2</sup> )	Jarak thd alas (m)	Statis Momen (A*y)	Inersia Momen (A*y <sup>2</sup> )	Inersia Momen (I <sub>o</sub> )
	L (m)	T (m)							
1	5,5	0,3	1	1	1,65	2,25	3,71	8,35	0,01
2	0,75	0,2	1	2	0,30	2,30	0,69	1,59	0,00
3	0,75	0,1	0,5	2	0,08	2,15	0,16	0,35	0,00
4	1,8	0,4	1	2	1,44	1,20	1,73	2,07	0,02
5	1,8	0,4	1	1	0,72	1,20	0,86	1,04	0,01
6	4	0,3	1	1	1,20	0,15	0,18	0,03	0,01
7a	0,2	0,2	0,5	4	0,08	1,97	0,16	0,31	0,00
7b	0,2	0,2	0,5	4	0,08	0,37	0,03	0,01	0,00
8	0,3	0,15	0,5	2	0,05	0,20	0,01	0,00	0,00
Jumlah					5,59		7,53	13,75	0,05

Tabel 5.3 Propertis penampang *box girder*  $h = 2,2$  m

No	Dimensi		Shape Factor	Jml Tampang	Luas Tampang (m <sup>2</sup> )	Jarak thd alas (m)	Statis Momen (A*y)	Inersia Momen (A*y <sup>2</sup> )	Inersia Momen (I <sub>o</sub> )
	L (m)	T (m)							
1	5,5	0,3	1	1	1,65	2,05	3,38	6,93	0,01
2	0,75	0,2	1	2	0,30	2,10	0,63	1,32	0,00
3	0,75	0,1	0,5	2	0,08	1,95	0,15	0,29	0,00
4	1,6	0,4	1	2	1,28	1,10	1,41	1,55	0,02
5	1,6	0,4	1	1	0,64	1,10	0,70	0,77	0,01
6	4	0,3	1	1	1,20	0,15	0,18	0,03	0,01
7a	0,2	0,2	0,5	4	0,08	1,77	0,14	0,25	0,00
7b	0,2	0,2	0,5	4	0,08	0,37	0,03	0,01	0,00
8	0,3	0,15	0,5	2	0,05	0,20	0,01	0,00	0,00
Jumlah					5,35		6,63	11,15	0,05

Tabel 5.4 Propertis penampang *box girder*  $h = 2$  m

No	Dimensi		Shape Factor	Jml Tampang	Luas Tampang (m <sup>2</sup> )	Jarak thd alas (m)	Statis Momen (A*y)	Inersia Momen (A*y <sup>2</sup> )	Inersia Momen (I <sub>o</sub> )
	L (m)	T (m)							
1	5,5	0,3	1	1	1,65	1,85	3,05	5,65	0,01
2	0,75	0,2	1	2	0,30	1,90	0,57	1,08	0,00
3	0,75	0,1	0,5	2	0,08	1,75	0,13	0,23	0,00
4	1,4	0,4	1	2	1,12	1,00	1,12	1,12	0,01
5	1,4	0,4	1	1	0,56	1,00	0,56	0,56	0,01
6	4	0,3	1	1	1,20	0,15	0,18	0,03	0,01
7a	0,2	0,2	0,5	4	0,08	1,57	0,13	0,20	0,00
7b	0,2	0,2	0,5	4	0,08	0,37	0,03	0,01	0,00
8	0,3	0,15	0,5	2	0,05	0,20	0,01	0,00	0,00
Jumlah					5,11		5,78	8,88	0,05

- a. Tinggi *box girder* prategang ( $h$ ) = 2,6 m  
 b. Luas penampang *box girder* bruto :  $A_{bruto} = 5,83 \text{ m}^2$   
 c. Letak titik berat :

$$c_b = \frac{\Sigma A \cdot y}{\Sigma A} = \frac{8,48}{5,83} = 1,455 \text{ m}$$

$$c_t = h - c_b = 2,6 - 1,455 = 1,145 \text{ m}$$

- d. Momen inersia terhadap alas balok :

$$\begin{aligned} I_b &= \Sigma(A \cdot y^2) + \Sigma I_o \\ &= 16,66 + 0,06 \\ &= 16,720 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- e. Momen inersia terhadap titik berat balok:

$$\begin{aligned} I_x &= I_b - A \cdot c_b^2 \\ &= 16,72 - (5,83 \cdot 1,455^2) \\ &= 4,384 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- 1) Modulus penampang bagian atas:

$$S_a = \frac{I_x}{c_t} = \frac{4,384}{1,145} = 3,828 \text{ m}^3$$

- 2) Modulus penampang bagian bawah:

$$S_b = \frac{I_x}{c_b} = \frac{4,384}{1,455} = 3,014 \text{ m}^3$$

- 3) Radius girasi:

$$r_2 = \frac{I_x}{A_c} = \frac{4,384}{5,83} = 0,752 \text{ m}$$

- 4) Batas Kern:

$$\text{Kern atas } K_a = \frac{r_2}{c_b} = \frac{0,752}{1,455} = 0,517 \text{ m}$$

$$\text{Kern atas } K_b = \frac{r_2}{c_t} = \frac{0,752}{1,145} = 0,657 \text{ m}$$

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.5 hasil rekap perhitungan momen inersia, modulus penampang dan letak titik berat dari masing-masing variasi tinggi yang digunakan pada penelitian.

Tabel 5.5 Rekap perhitungan penampang *box girder*

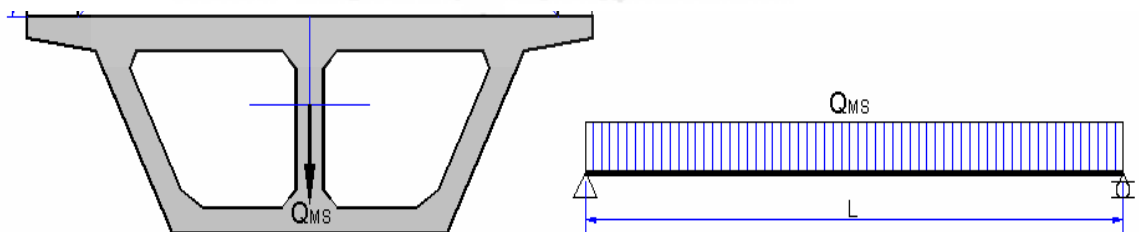
$h$	2 m	2,2 m	2,4 m	2,6 m
$A_{bruto} (m^2)$	5,11	5,35	5,59	5,83
$C_b (m)$	1,131	1,239	1,347	1,455
$C_t (m)$	0,869	0,961	1,053	1,145
$I_b (m^4)$	8,922	11,204	13,799	16,720
$I_x (m^4)$	2,390	2,987	3,652	4,384
$S_a (m^3)$	2,749	3,109	3,469	3,828
$S_b (m^3)$	2,114	2,410	2,710	3,014
$r_2 (m)$	0,468	0,558	0,653	0,752
$K_a (m)$	0,414	0,451	0,485	0,517
$K_b (m)$	0,538	0,581	0,621	0,657

### 5.2.2. Perhitungan Pembebanan Balok Prategang

Perhitungan pembebanan balok prategang meliputi beban mati, beban hidup lajur D, beban rem, beban angin dan beban gempa.

#### 1. Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri (*self weight*) adalah berat bahan dan bagian jembatan yang merupakan elemen struktural ditambah dengan elemen non-struktural yang dipikulnya dan bersifat tetap. Berat sendiri dihitung sebagai berikut (lihat Gambar 5.3)



Gambar 5.3 Pembebanan berat sendiri (MS) pada balok  
( Sumber : RSNI-T-02-2005 )

a. Berat sendiri *box girder*

Dari perhitungan modulus penampang dengan luas penampang  $A = 5,83 \text{ m}^2$  dan berat beton prategang  $wc = 25,5 \text{ kN/m}^3$ , maka diperoleh berat sendiri balok,  $Q_{bs} = A \cdot wc = 5,83 \cdot 25,5 = 148,665 \text{ kN/m}$ .

b. Berat trotoar dan *railing* dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Berat trotoar dan *railing*

No	$b$ (m)	$h$ (m)	$L$ (m)	Shape Factor	$Wc$ (kN/m <sup>3</sup> )	Berat (kN/m)	
1	0,75	0,25	1	1	25	4,6875	
2	0,25	1	1	1	25	6,25	
5	SGP 3" dengan berat/m					80,07	0,6475
Jumlah berat trotoar dan dinding pagar tepi =						11,585	

Sehingga berat trotoar dan tiang *railing* permeter adalah 11,585 kN/m

c. Berat diafragma

1) Ukuran diafragma lapangan,

$$\text{Tebal} = 0,25 \text{ m}$$

$$b_1 = 2,15 \text{ m}$$

$$b_2 = 1,8 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi} = 2 \text{ m}$$

2) Berat jenis beton prategang,  $wc = 25 \text{ kN/m}^3$

3) Berat diafragma persegi,

$$A_{\text{diafragma}} = \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot t$$

$$= \frac{1}{2} \cdot (2,15 + 1,8) \cdot 2$$

$$= 3,95 \text{ m}^2$$

$$W_{\text{diafragma}} = A \cdot \text{tebal} \cdot wc \cdot n$$

$$= 3,95 \cdot 0,25 \cdot 25 \cdot 2$$

$$= 49,375 \text{ kN}$$

4) Panjang jembatan,  $L = 50 \text{ m}$

5) Jumlah diafragma,  $n = 2$  buah

6) Jarak antar diafragma,  $x = 12,5 \text{ m}$

7) Momen maksimum akibat beban diafragma di tengah bentang :

$$\begin{aligned} M_{\max} &= (0,5 \cdot n \cdot x1) \cdot W_{\text{diafragma}} \\ &= (0,5 \cdot 2 \cdot 50) \cdot 49,375 \\ &= 2468,8 \text{ kNm} \end{aligned}$$

8) Berat diafragma ekuivalen :

$$\begin{aligned} Q_{\text{diafragma}} &= \frac{8 \cdot M_{\max}}{L^2} \\ &= \frac{8 \cdot 2468,8}{50^2} = 7,9 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.7 – Tabel 5.10 hasil rekap perhitungan berat sendiri struktur atas dari masing-masing variasi tinggi yang digunakan pada penelitian.

Tabel 5.7 Rekap berat sendiri struktur atas ( $Q_{ms}$ ) dengan tinggi *box* 2,6 m

No	Jenis Berat sendiri konstruksi	Berat (kN/m)
1	<i>Box girder prestress</i>	148,665
2	Diafragma	7,9
3	Trotoar dan dinding pagar tepi	11,585
$Q_{MS}$		<b>168,15</b>

Tabel 5.8 Rekap berat sendiri struktur atas ( $Q_{ms}$ ) dengan tinggi *box* 2,4 m

No	Jenis Berat sendiri konstruksi	Berat (kN/m)
1	<i>Box girder prestress</i>	142,545
2	Diafragma	7,11
3	Trotoar dan dinding pagar tepi	11,585
$Q_{MS}$		<b>161,240</b>

Tabel 5.9 Rekap berat sendiri struktur atas ( $Q_{ms}$ ) dengan tinggi *box* 2,2 m

No	Jenis Berat sendiri konstruksi	Berat (kN/m)
1	<i>Box girder prestress</i>	136,425
2	Diafragma	6,32
3	Trotoar dan dinding pagar tepi	11,585
$Q_{MS}$		<b>154,330</b>

Tabel 5.10 Rekap berat sendiri struktur atas ( $Q_{ms}$ ) dengan tinggi *box* 2 m

No	Jenis Berat sendiri konstruksi	Berat (kN/m)
1	<i>Box girder prestress</i>	130,305
2	Diafragma	5,530
3	Trotoar dan dinding pagar tepi	11,585
<b><math>Q_{MS}</math></b>		<b>147,420</b>

d. Momen akibat berat sendiri

1) Momen maksimum di tengah bentang,

$$M_{bs} = \frac{1}{8} \cdot Q_{bs} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 168,15 \cdot 50^2 = 52547 \text{ kNm}$$

2) Gaya geser maksimum di tumpuan,

$$V_{bs} = \frac{1}{4} \cdot Q_{bs} \cdot L = \frac{1}{4} \cdot 168,15 \cdot 50 = 2101,9 \text{ kN}$$

e. Momen akibat berat *Box Girder*

1) Momen maksimum di tengah bentang,

$$M_{bs} = \frac{1}{8} \cdot Q_{bs} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 148,665 \cdot 50^2 = 46457,81 \text{ kNm}$$

2) Gaya geser maksimum di tumpuan,

$$V_{bs} = \frac{1}{4} \cdot Q_{bs} \cdot L = \frac{1}{4} \cdot 148,665 \cdot 50 = 1858,31 \text{ kN}$$

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.11 hasil rekap perhitungan momen akibat berat sendiri struktur atas dari masing-masing variasi tinggi yang digunakan pada penelitian.

Tabel 5.11 Rekap momen akibat berat sendiri dan *box girder*

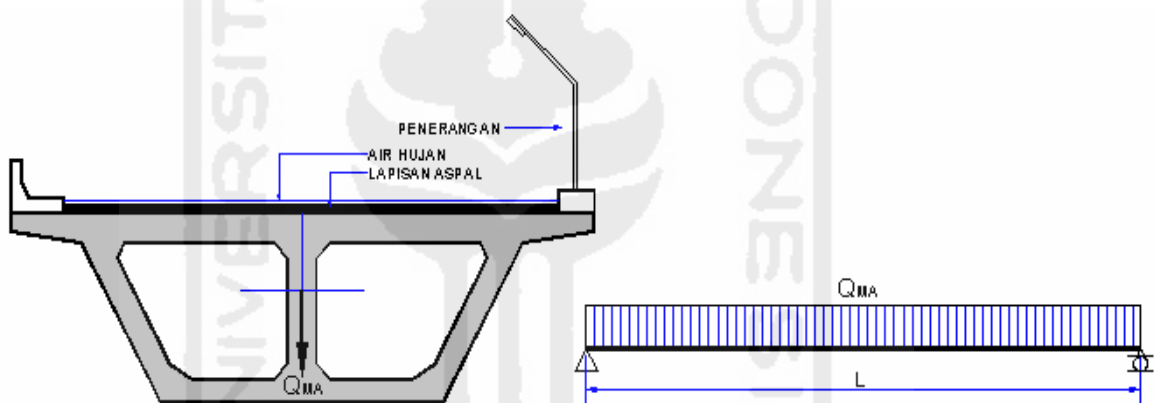
$h$ (m)	Berat Sendiri		<i>Box Girder</i>	
	$M_{bs}$ (kNm)	$V_{bs}$ (kN)	$M_{bs}$ (kNm)	$V_{bs}$ (kN)
2	46069	1842,8	40720,31	1628,81
2,2	48228	1929,1	42632,81	1705,31
2,4	50388	2015,5	44545,31	1781,81
2,6	52547	2101,9	46457,81	1858,31



## 2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan (*superimposed dead load*) adalah berat seluruh bahan yang menimbulkan suatu beban pada balok jembatan yang merupakan elemen non-struktural dan mungkin besarnya berubah selama umur jembatan. Gelagar/balok jembatan direncanakan mampu memikul beban mati tambahan berupa (lihat Gambar 5.4) :

- aspal beton setebal 100 mm untuk pelapisan kembali dikemudian hari (*overlay*) (SNI-T-02-2005 Pasal 5.3.2),
- genangan air hujan setinggi 50 mm apabila saluran drainase tidak bekerja dengan baik, dan
- tiang listrik (*light*) dengan berat 0,1 kN/m.



Gambar 5.4 Pembebanan beban mati tambahan (MA) pada balok  
( Sumber : RSNI-T-02-2005 )

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.12 hasil rekap perhitungan beban mati tambahan struktur atas yang digunakan pada semua variasi tinggi.

Tabel 5.12 Rekap beban mati tambahan struktur atas ( $q_{ma}$ )

No	Jenis Beban Mati Tambahan	B (m)	h (m)	A (m <sup>2</sup> )	w (kN/m <sup>3</sup> )	$Q_{MA}$ (kN/m)
1	Lapisan aspal + overlay	5,50	0,10	0,55	22,00	12,10
2	Air hujan	5,50	0,05	0,28	9,80	2,70
3	Tiang listrik (LPJ)					0,1
Total berat sendiri					$Q_{MA}$	<b>14,895</b>

d. Momen akibat beban mati tambahan

1) Momen maksimum di tengah bentang,

$$M_{bs} = \frac{1}{8} \cdot Q_{bs} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 14,895 \cdot 50^2 = 4654,7 \text{ kNm}$$

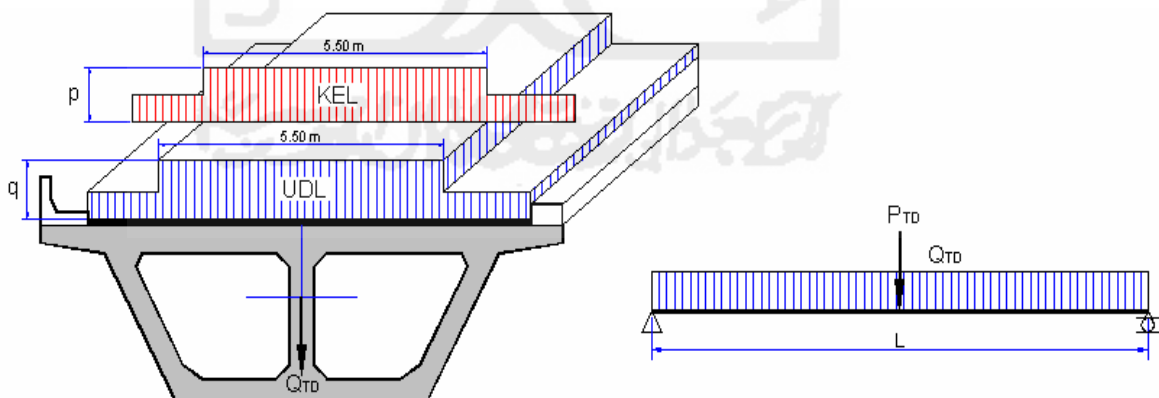
2) Gaya geser maksimum di tumpuan,

$$V_{bs} = \frac{1}{4} \cdot Q_{bs} \cdot L = \frac{1}{4} \cdot 14,895 \cdot 50 = 372,38 \text{ kN}$$

### 3. Beban Lajur "D" (TD)

Beban Lajur "D" terdiri dari beban terbagi merata (*Uniformly Distributed Load*) UDL dan beban garis (*Knife Edge Load*) KEL seperti terlihat pada Gambar 5.5 . UDL mempunyai intensitas  $q$  (kPa) yang besarnya tergantung pada panjang total  $L$  yang dibebani dan dinyatakan dengan rumus sebagai berikut:

- $q = 9,0 \text{ kPa}$  ; untuk  $L \leq 30 \text{ m}$
- $q = 9,0 \cdot (0,5 + 15 / L) \text{ kPa}$  ; untuk  $L > 30 \text{ m}$
- KEL mempunyai intensitas,  $p = 49,0 \text{ kN/m}$
- Faktor beban dinamis (*Dinamic Load Allowance*) untuk KEL diambil sebagai berikut:



Gambar 5.5 Pembebanan lajur "D" pada balok

(Sumber RSNI-T-02-2005)

Panjang bentang,  $L = 50$  m

Lebar jalur lalu-lintas,  $B = 5,5$  m

e. Beban merata ( $UDL$ )

$$q = 9,0 \cdot \left( 0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa, untuk } L = 50 \text{ m} > 30 \text{ m} = 9,0 \cdot \left( 0,5 + \frac{15}{50} \right) \\ = 7,2 \text{ kPa}$$

Pembebanan beban lajur D :

Beban merata pada balok ( $UDL$ ):

$$Q_{TD} = [ 5,5 \cdot q \cdot 100\% ] \\ = [ 5,5 \cdot 7,2 \cdot 100\% ] = 39,6 \text{ kN/m}$$

f. Beban Terpusat ( $P_{TD}$ )

1) Beban intensitas  $p = 49$  kN/m

2) Dari peraturan Perencanaan Jembatan , beban dinamis untuk pembebanan truk “T” diambil:

$$DLA = 0,4$$

3) Beban terpusat pada balok,

$$P_{TD} = (1 + DLA) \cdot p \cdot l \\ = (1 + 0,4) \cdot 49 = 68,6 \text{ kN}$$

4) Momen max akibat beban lajur “D” ( $T_D$ )

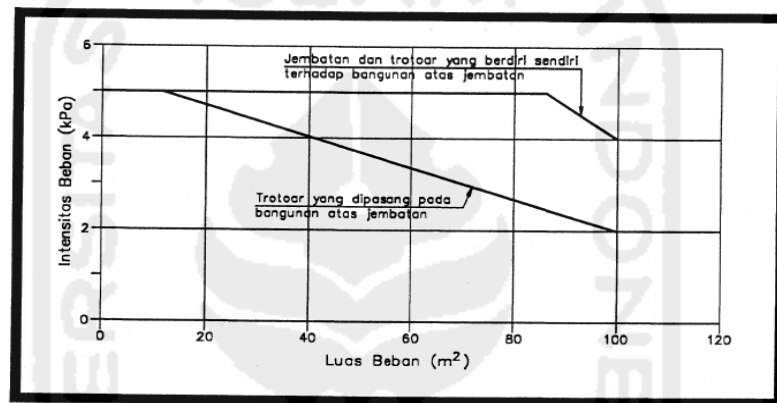
$$M_{TD} = \frac{1}{8} \cdot Q_{TD} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P_{TD} \cdot L \\ = \frac{1}{8} \cdot 39,6 \cdot 50^2 + \frac{1}{4} \cdot 68,6 \cdot 50 = 13233 \text{ kNm}$$

5) Gaya geser max akibat beban lajur “D” ( $T_D$ )

$$V_{TD} = \frac{1}{2} \cdot Q_{TD} \cdot L + \frac{1}{2} \cdot P_{TD} \cdot l \\ = \frac{1}{2} \cdot 39,6 \cdot 50 + \frac{1}{2} \cdot 68,6 = 1024,3 \text{ kN}$$

#### 4. Beban Pejalan Kaki (TP)

Trotoar pada jembatan jalan raya direncanakan mampu memikul beban. Beban yang akan ditahan oleh trotoar adalah beban pejalan kaki. Distribusi beban pejalan kaki hanya pada balok-balok tepi jembatan. Beban pejalan kaki diperhitungkan sebagai beban hidup merata trotoar. Menurut RSNI-T-02-2005 Pasal 6.9. Grafik pembebanan pejalan kaki dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Beban pejalan kaki

( Sumber : RSNI-T-02-2005 )

- Dengan  $A$  = Luas bidang trotoar yang dibebani pejalan kaki ( $m^2$ )
- Lebar trotoar,  $bt = 0,75 \text{ m}$
- Panjang bentang,  $L = 50 \text{ m}$
- Luas trotoar ( $A$ ) =  $bt \cdot L = 0,75 \cdot 50 = 37,5 \text{ m}^2$
- Intensitas beban trotoar (Untuk ,  $A < 100 \text{ m}^2$ ) maka :  
 $q = 4,5 \text{ kPa}$
- Pembebanan untuk trotoar diperhitungkan sebagai beban merata.  
 $Q_{TP} = q \cdot bt = 4,5 \cdot 0,75 = 3,375 \text{ kN/m}$
- Momen max akibat beban pejalan kaki (TP)

$$M_{TP} = \frac{1}{8} \cdot Q_{TP} \cdot L^2$$

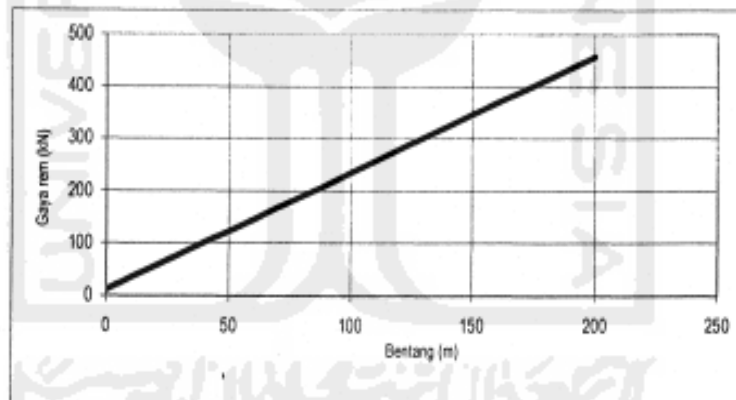
$$= \frac{1}{8} \cdot 3,375 \cdot 50^2 = 1054,688 \text{ kNm}$$

h. Gaya geser max akibat beban pejalan kaki (TP)

$$\begin{aligned} V_{TP} &= \frac{1}{2} \cdot Q_{TP} \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \cdot 3,375 \cdot 50 = 84,375 \text{ kN} \end{aligned}$$

#### 5. Beban Rem (TB)

Pengaruh pengereman dari lalu-lintas diperhitungkan sebagai gaya dalam arah memanjang dan dianggap bekerja pada jarak 1,80 m di atas permukaan lantai jembatan. Besarnya gaya rem arah memanjang jembatan (lihat Gambar 5.7) tergantung panjang total jembatan ( $L_t$ ) sebagai berikut ini.



Gambar 5.7 Gaya rem per lajur 2,75 m

( Sumber : RSNI-T-02-2005 )

- Panjang bentang,  $L = 50 \text{ m}$
- Lebar lalu lintas,  $B = 5,5 \text{ m}$
- Untuk bangunan gelagar,  $L_t 50 \text{ m}$ , maka diambil:
- Gaya rem ( $T_{TB}$ ) =  $2 \cdot 120 = 240 \text{ kN}$
- Momen akibat Beban Rem ( $M_{TB}$ )
- Lengan terhadap titik berat *box girder*,

$$y = 1,80 + t_a + y_a$$

$$= 1,80 + 0,1 + 1,145 = 3,045 \text{ m}$$

- g. Beban momen akibat gaya rem,

$$M = T_{TB} \cdot y$$

$$= 240 \cdot 3,045 = 730,892 \text{ kNm}$$

- h. Momen maksimum pada *box girder* akibat gaya rem,

$$M_{TB} = \frac{1}{2} \cdot M = \frac{1}{2} \cdot 730,892 = 365,446 \text{ kNm}$$

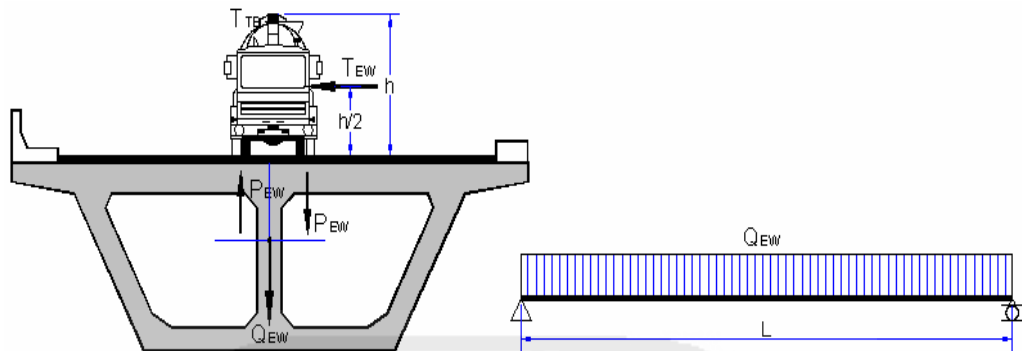
- i. Gaya geser maksimum pada *box girder* akibat gaya rem,

$$V_{TB} = M / L = 730,892 / 50 = 14,6118 \text{ kN}$$

#### 6. Beban Angin (EW)

Beban garis merata tambahan arah horizontal pada permukaan lantai jembatan akibat angin yang meniup kendaraan di atas lantai jembatan dihitung dengan rumus:

- $T_{EW} = 0,0012 \cdot C_w \cdot (V_w)^2$  kN/m dengan,
- $C_w =$  koefisien seret = 1,2 (SNI-T-02-2005 pasal 7.6)
- $V_w =$  kecepatan angin rencana = 30 m/dt (SNI-T-02-2005 pasal 7.6)
- $T_{EW} = 0,0012 \cdot 1,2 \cdot (30)^2 = 1,8144$  kN/m
- Faktor beban *ultimate* :  $K_{EW} = 1,2$
- Bidang vertikal yang ditiup angin merupakan bidang samping kendaraan dengan tinggi  $h = 2,0$  m di atas lantai jembatan, sedangkan jarak antar roda kendaraan  $x = 1,75$  m (lihat Gambar 5.8).



Gambar 5.8 Pembebanan beban angin (EW) pada balok

(Sumber : RSNI-T-02-2005)

- g. Transfer beban angin ke lantai jembatan,

$$\begin{aligned}
 h. \quad Q_{EW} &= \left[ 0,5 \cdot \frac{h}{x} \cdot T_{EW} \right] \cdot 2 \\
 &= \left[ 0,5 \cdot \frac{2,0}{1,75} \cdot 1,8144 \right] \cdot 2 \\
 &= 2,0736 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

- i. Momen max akibat beban angin ( $Q_{EW}$ ),

$$\begin{aligned}
 M_{EW} &= \frac{1}{8} \cdot Q_{EW} \cdot L^2 \\
 &= \frac{1}{8} \cdot 2,0736 \cdot 50^2 = 648 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

- j. Gaya geser max akibat beban angin ( $Q_{EW}$ ),

$$\begin{aligned}
 V_{EW} &= \frac{1}{2} \cdot Q_{EW} \cdot L \\
 &= \frac{1}{2} \cdot 2,0736 \cdot 50 = 51,84 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

## 7. Beban Gempa (EQ)

Gaya gempa vertikal pada balok dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$T_{EQ} = K_v.W_t.I$$

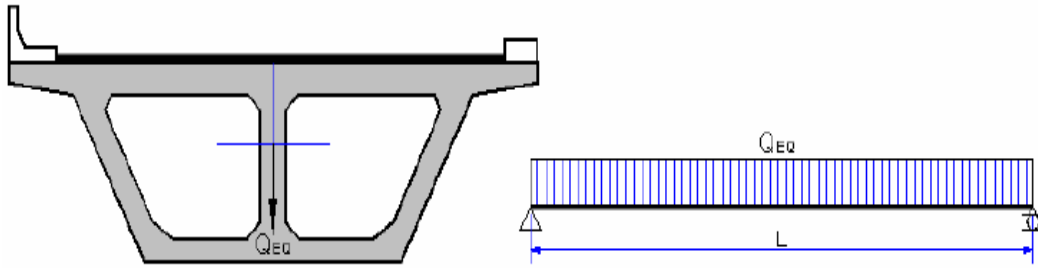
$W_t$  = Berat total struktur yang berupa berat sendiri dan beban mati tambahan,

$$W_t = P_{MS} + P_{MA}$$

- a. Berat sendiri,  $Q_{MS} = 168,15 \text{ kN/m}$
- b. Beban mati tambahan,  $Q_{MA} = 14,895 \text{ kN/m}$
- c. Panjang bentang,  $L = 50 \text{ m}$
- d.  $W_t = (Q_{MS} + Q_{MA}) \cdot L = 9152,251 \text{ kN}$
- e. Momen inersia balok prategang,  $I_x = 4,384 \text{ m}^4$
- f. Modulus elastik beton,  $E_c = 39074,5 \text{ MPa} = 39074497 \text{ kPa}$
- g. Kekakuan balok,  $K_p = 48.E_c.I_x/L^3 = 48.39074497.4,384/50^3$   
 $= 65786,22 \text{ kN/m}$
- h. Waktu getar struktur,  $T = 2.\pi.\sqrt{\frac{W_t}{g.K_p}} = 2.\pi.\sqrt{\frac{9152,251}{9,81.65786,22}} = 0,748 \text{ dt}$
- i. Untuk lokasi wilayah gempa 3 (Yogyakarta) di atas tanah jelek, dari grafik diperoleh.
  - 1) Nilai koefisien geser dasar ( $C = 0,155$ )
  - 2) Faktor kepentingan bangunan ( $I = 1$ )
  - 3) Jumlah sendi plastis ( $n = 1$ )
  - 4) Faktor perangkaan ( $F = 1,25 - 0,025.n > 1$ )  
 $(F = 1,25 - 0,025.1 = 1,225 > 1)$
  - 5) Faktor tipe struktur ( $S = 1.F = 1.1,225 = 1,225$ )
  - 6) Koefisien beban gempa horisontal ( $K_h = C.S = 0,155.1,225 = 0,1899$ )
  - 7) Koefisien beban gempa vertikal ( $K_v = 50\%.K_h$ , SNI 2833 2008 Pasal 4.10)  $= 50\%.0,1899 = 0,0949 < 0,1$
  - 8) Gaya gempa vertikal ( $T_{EQ} = K_v.W_t.I = 0,0949.9152,251.1 = 915,2251 \text{ kN}$ )

Berikut contoh pembebanan merata akibat dari beban gempa pada jembatan dapat dilihat pada Gambar 5.9.





Gambar 5.9 Pembebanan beban gempa ( $Q_{EQ}$ ) pada balok

( Sumber : RSNI-T-02-2005 )

9) Beban gempa vertikal ( $Q_{EQ} = T_{EQ}/L = 915,2251/50 = 18,3045 \text{ kN/m}$ )

10) Momen max akibat beban gempa ( $Q_{EQ}$ ),

$$M_{EQ} = \frac{1}{8} \cdot Q_{EQ} \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 18,3045 \cdot 50^2 = 5720,157 \text{ kNm}$$

11) Gaya geser max akibat beban gempa ( $Q_{EQ}$ ),

$$\begin{aligned} V_{EQ} &= \frac{1}{2} \cdot Q_{EQ} \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \cdot 18,3045 \cdot 50 = 457,613 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.13 hasil rekap perhitungan beban gempa pada variasi tinggi *box girder* yang digunakan.

Tabel 5.13 Rekap beban gempa pada variasi tinggi *box girder*

$h$ (m)	<b>2 m</b>	<b>2,2 m</b>	<b>2,4 m</b>	<b>2,6 m</b>
$T$ (detik)	0,9183	0,8387	0,7739	0,7482
$Kh$	0,1899	0,1899	0,1899	0,1899
$Kv$	0,0949	0,0949	0,0949	0,0949
$T_{EQ}$	811,5751	846,1251	880,6751	915,2251
$Q_{EQ}$	16,2315	16,9225	17,6135	18,3045
$V_{EQ}$	405,7876	423,0626	440,3376	457,6126
$M_{EQ}$	5072,344	5288,282	5504,219	5720,157

Rekapitulasi pembebanan balok prategang pada masing-masing tinggi dapat dilihat pada Tabel 5.14 – Tabel 5.17 dan Persamaan momen gaya dan gaya geser pada balok prategang dapat dilihat pada Tabel 5.18 berikut ini.

Tabel 5.14 Rekap beban struktur atas  $h = 2,6$  m

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	Keterangan
1	Berat sendiri <i>box girder</i>	bs	148,67	-	-	Beban merata, $Q_{bs}$
2	Berat sendiri	MS	168,15	-	-	Beban merata, $Q_{MS}$
3	Beban mati tambahan	MA	14,895	-	-	Beban merata, $Q_{MA}$
4	Beban Lajur "D"	TD	39,6	68,6	-	Beban merata, $Q_{MA}$ dan terpusat $P_{TD}$
5	Beban pejalan kaki	TP	3,375	-	-	Beban merata, $Q_{TP}$
6	Gaya rem	TB	-	-	730,892	Beban momen, $M_{TB}$
7	Angin	EW	2,074	-	-	Beban merata, $Q_{EW}$
8	Gempa	EQ	18,305	-	-	Beban merata, $Q_{EQ}$

Tabel 5.15 Rekap beban struktur atas  $h = 2,4$  m

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	Keterangan
1	Berat sendiri <i>box girder</i>	bs	142,55	-	-	Beban merata, $Q_{bs}$
2	Berat sendiri	MS	161,24	-	-	Beban merata, $Q_{MS}$
3	Beban mati tambahan	MA	14,895	-	-	Beban merata, $Q_{MA}$
4	Beban Lajur "D"	TD	39,6	68,6	-	Beban merata, $Q_{MA}$ dan terpusat $P_{TD}$
5	Beban pejalan kaki	TP	3,375	-	-	Beban merata, $Q_{TP}$
6	Gaya rem	TB	-	-	708,648	Beban momen, $M_{TB}$
7	Angin	EW	2,074	-	-	Beban merata, $Q_{EW}$
8	Gempa	EQ	17,614	-	-	Beban merata, $Q_{EQ}$

Tabel 5.16 Rekap beban struktur atas  $h = 2,2$  m

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	Keterangan
1	Berat sendiri <i>box girder</i>	bs	136,43	-	-	Beban merata, $Q_{bs}$
2	Berat sendiri	MS	154,33	-	-	Beban merata, $Q_{MS}$
3	Beban mati tambahan	MA	14,895	-	-	Beban merata, $Q_{MA}$
4	Beban Lajur "D"	TD	39,6	68,6	-	Beban merata, $Q_{MA}$ dan terpusat $P_{TD}$
5	Beban pejalan kaki	TP	3,375	-	-	Beban merata, $Q_{TP}$
6	Gaya rem	TB	-	-	686,561	Beban momen, $M_{TB}$
7	Angin	EW	2,074	-	-	Beban merata, $Q_{EW}$
8	Gempa	EQ	16,92	-	-	Beban merata, $Q_{EQ}$

Tabel 5.17 Rekap beban struktur atas  $h = 2$  m

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	Keterangan
1	Berat sendiri <i>box girder</i>	bs	130,31	-	-	Beban merata, $Q_{bs}$
2	Berat sendiri	MS	147,42	-	-	Beban merata, $Q_{MS}$
3	Beban mati tambahan	MA	14,895	-	-	Beban merata, $Q_{MA}$
4	Beban Lajur "D"	TD	39,6	68,6	-	Beban merata, $Q_{MA}$ dan terpusat $P_{TD}$
5	Beban pejalan kaki	TP	3,375	-	-	Beban merata, $Q_{TP}$
6	Gaya rem	TB	-	-	664,654	Beban momen, $M_{TB}$
7	Angin	EW	2,074	-	-	Beban merata, $Q_{EW}$
8	Gempa	EQ	16,23	-	-	Beban merata, $Q_{EQ}$

Tabel 5.18 Persamaan momen dan gaya geser pada balok prategang

No	Jenis Beban	Persamaan Momen	Persamaan Gaya Geser
1	Berat sendiri <i>box girder</i>	$M_x = 1/2 * Q_{bs} * (L * X - X^2)$	$V_x = Q_{bs} * (L/2 - X)$
2	Berat sendiri	$M_x = 1/2 * Q_{MS} * (L * X - X^2)$	$V_x = Q_{MS} * (L/2 - X)$
3	Beban mati tambahan	$M_x = 1/2 * Q_{MA} * (L * X - X^2)$	$V_x = Q_{MA} * (L/2 - X)$
4	Beban Lajur "D"	$M_x = 1/2 * Q_{TD} * (L * X - X^2) + 1/2 * P_{TD} * X$	$V_x = Q_{TD} * (L/2 - X) + 1/2 * P_{TD}$
5	Beban pejalan kaki	$M_x = 1/2 * Q_{TP} * (L * X - X^2)$	$V_x = Q_{TP} * (L/2 - X)$
6	Gaya rem	$M_x = X/L * M_{TB}$	$V_x = M_{TB}/L$
7	Angin	$M_x = 1/2 * Q_{EW} * (L * X - X^2)$	$V_x = Q_{EW} * (L/2 - X)$
8	Gempa	$M_x = 1/2 * Q_{EQ} * (L * X - X^2)$	$V_x = Q_{EQ} * (L/2 - X)$

### 5.2.3. Perhitungan Tegangan Ijin, Gaya Prategang dan Eksentrisitas

Pada dasarnya baik pada sistem pratarik maupun paskatarik, pola tegangan umumnya ditinjau atau diperiksa pada dua keadaan yang berbeda. Penetapan batasan-batasan tegangan ijin dengan kuat desak beton,  $f'c = 49,8$  MPa. Pada saat transfer umur beton baru 14 hari sehingga kekuatan beton baru mencapai 80%, maka:  $f'ci = 80\% \cdot f'c = 0,80 \cdot 49,8 = 39,84$  MPa. Tegangan ijin beton adalah sebagai berikut.

#### 1. Saat transfer

$$\text{serat tekan} : f_{ci} = 0,60 \cdot f'c = 0,60 \cdot 39,84 = 23,904 \text{ MPa}$$

$$\text{serat tarik} : f_{ti} = 0,25 \cdot \sqrt{f'ci} = 0,25 \cdot \sqrt{39,84} = 1,578 \text{ MPa}$$

## 2. Saat layan,

$$\text{serat tekan} : f_{cs} = 0,45 \cdot f'_c = 0,45 \cdot 39,84 = 22,410 \text{ MPa}$$

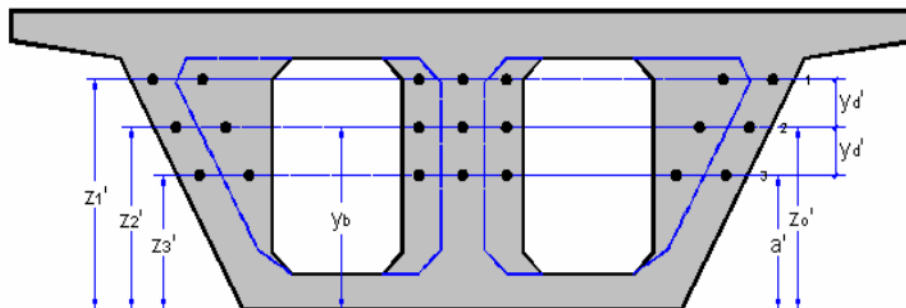
$$\text{serat tarik} : f_{ts} = 0,50 \cdot \sqrt{f'_c} = 0,50 \cdot \sqrt{39,84} = 3,528 \text{ MPa}$$

Setelah dapat membedakan tegangan ijin pada saat transfer dan layanan, selanjutnya dapat menghitung gaya prategang, eksentrisitas dan jumlah tendon dengan sebagai berikut. Berikut Tabel 5.19 berisi rekap perhitungan tegangan ijin sesuai variasi mutu beton yang digunakan.

Tabel 5.19 Rekap perhitungan tegangan ijin beton

	$f'_c$ (MPa)			
	41,5	49,8	58,1	66,4
$f_{ci}$ (MPa)	19,92	23,904	27,888	31,872
$f_{ti}$ (MPa)	1,44	1,578	1,704	1,822
$f_{cs}$ (MPa)	18,675	22,410	26,145	29,880
$f_{ts}$ (MPa)	3,221	3,528	3,811	4,074

Menghitung gaya prategang awal ditinjau pada kondisi transfer yaitu pemeriksaan tegangan saat pemberian gaya prategang. Perhitungan besar gaya prategang awal dihitung dengan persamaan tegangan di kondisi saat transfer dengan terlebih dahulu menetapkan jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* untuk mendapatkan nilai eksentrisitas. Ditetapkan jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* ( $z_0$ ) sebesar 0,3 m. Berikut dapat dilihat Gambar 5.10 contoh letak ( $z_0$ ) pada struktur *box girder*

Gambar 5.10 Penampang *box girder*

a. Eksentrisitas tendon,  $e_s = c_b - z_0 = 1,4546 - 0,3 = 1,155 \text{ m}$

b. Tegangan pada serat atas,

$$f_t = -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \cdot e_s}{s_a} - \frac{M_{bs}}{s_a}$$

$$1577,973 = -\frac{P_t}{5,830 \cdot 10^6} + \frac{P_t \cdot 1,155 \cdot 10^3}{3,828 \cdot 10^9} - \frac{46457,813 \cdot 10^6}{3,828 \cdot 10^9}$$

$$P_t = 105411,17 \text{ kN}$$

c. Tegangan pada serat bawah,

$$f_b = -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{s_b} + \frac{M_{bs}}{s_b}$$

$$-23904 = -\frac{P_t}{5,830 \cdot 10^6} - \frac{P_t \cdot 1,155 \cdot 10^3}{3,014 \cdot 10^9} + \frac{46457,813 \cdot 10^6}{3,014 \cdot 10^9}$$

$$P_t = 70893,819 \text{ kN}$$

Diambil nilai terkecil,  $P_t = 70893,819 \text{ kN}$

d. Gaya prategang awal,  $P_o = 70893,8192 \text{ kN}$

e. Kehilangan gaya prategang (*LOF*) untuk paskatatik diperkirakan sebesar 25%, maka rasio kehilangan gaya prategang ( $R = 1 - LOF = 1 - 25\% = 75\%$ ). Maka gaya prategang efektif.

$$P_{eff} = R \cdot P_o = 75\% \cdot 70893,8192 = 62553,3698 \text{ kN}$$

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.20 hasil rekap gaya prategang awal *box girder* pada variasi tinggi dan eksentrisitas yang digunakan.

Tabel 5.20 Rekap perhitungan gaya prategang awal *box girder*

$h$ (m)	$f'c$ (MPa)	$z_0$	$e_s$	$P_{t1}$	$P_{t2}$	dipakai $P_t$
2	41,5	0,17	0,961	105709,70	60269,84	60269,84
		0,3	0,831	152664,92	66566,80	66566,80
		0,45	0,681	313176,28	75691,67	75691,67
	49,8	0,17	0,961	106603,87	66397,69	66397,69
		0,3	0,831	153956,27	73334,88	73334,88
		0,45	0,681	315825,36	83387,50	83387,50
	58,1	0,17	0,961	107426,15	72525,53	72525,53
		0,3	0,831	155143,80	80102,95	80102,95
		0,45	0,681	318261,44	91083,34	91083,34

Lanjutan Tabel 5.20 Rekap perhitungan gaya prategang awal *box girder*

$h$ (m)	$f_c$ (MPa)	$z_o$	$e_s$	$P_{t1}$	$P_{t2}$	dipakai $P_t$
	66,4	0,17	0,961	108191,50	78653,37	78653,37
		0,3	0,831	156249,11	86871,03	86871,03
		0,45	0,681	320528,88	98779,17	98779,17
2,2	41,5	0,17	1,069	96502,16	59639,68	59639,68
		0,3	0,939	131526,22	65218,28	65218,28
		0,45	0,789	226290,11	73108,85	73108,85
	49,8	0,17	1,069	97377,76	65957,30	65957,30
		0,3	0,939	132719,61	72126,85	72126,85
		0,45	0,789	228343,34	80853,26	80853,26
	58,1	0,17	1,069	98182,96	72274,92	72274,92
		0,3	0,939	133817,05	79035,41	79035,41
		0,45	0,789	230231,47	88597,67	88597,67
	66,4	0,17	1,069	98932,43	78592,55	78592,55
		0,3	0,939	134838,52	85943,98	85943,98
		0,45	0,789	231988,91	96342,09	96342,09
2,4	41,5	0,17	1,177	88983,05	59281,54	59281,54
		0,3	1,047	116089,20	64311,44	64311,44
		0,45	0,897	179008,11	71290,92	71290,92
	49,8	0,17	1,177	89839,65	89839,65	89839,65
		0,3	1,047	117206,74	71359,01	71359,01
		0,45	0,897	180731,35	79103,33	79103,33
	58,1	0,17	1,177	90627,38	72274,26	72274,26
		0,3	1,047	118234,43	78406,57	78406,57
		0,45	0,897	182316,02	86915,73	86915,73
	66,4	0,17	1,177	91360,57	78770,62	78770,62
		0,3	1,047	119190,97	85454,13	85454,13
		0,45	0,897	183791,01	94728,14	94728,14
2,6	41,5	0,17	1,285	82753,50	59113,04	59113,04
		0,3	1,155	104354,44	63710,20	63710,20
		0,45	1,005	149330,68	69990,69	69990,69
	49,8	0,17	1,285	83591,49	65778,31	65778,31
		0,3	1,155	105411,17	70893,82	70893,82
		0,45	1,005	150842,86	77882,47	77882,47
	58,1	0,17	1,285	84362,11	72443,58	72443,58
		0,3	1,155	106382,94	78077,44	78077,44
		0,45	1,005	152233,45	85774,25	85774,25
	66,4	0,17	1,285	85079,38	79108,86	79108,86
		0,3	1,155	107287,43	85261,06	85261,06
		0,45	1,005	153527,78	93666,03	93666,03

#### 5.2.4. Daerah Aman dan Momen Tendon

##### 1. Daerah Aman Tendon

Perencanaan Tata letak tendon dilakukan dengan peninjauan pada tengah bentang, seperempat bentang dan ujung balok.

##### a. Momen-momen

$$\text{Tengah bentang: } M = \frac{1}{8} \cdot w \cdot L^2$$

$$\text{Seperempat bentang: } M = \left(\frac{1}{2} \cdot w \cdot L\right) \frac{L}{4} - \left(w \cdot \frac{L}{4} \cdot \frac{L}{8}\right) = \frac{3}{32} \cdot w \cdot L^2$$

Pada ujung balok (tumpuan):  $M = 0$

- b. Momen di tengah bentang jembatan

Panjang bentang jembatan = 50 m

- c. Momen akibat berat sendiri balok

Berat sendiri balok, (WG) = 148,665 kN/m

$$M_G = \frac{1}{8} \cdot w_G \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 148,665 \cdot 50^2 = 46457,8125 \text{ kNm}$$

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.21 hasil rekap momen akibat berat sendiri balok *box girder* pada variasi tinggi yang digunakan.

Tabel 5.21 Rekap momen akibat berat sendiri balok

$h$	2,6 m	2,4 m	2,2 m	2 m
$M_G$ (kNm)	46457,8125	44545,3125	42632,8125	40720,3125

- d. Momen akibat beban mati *box girder*, pembebanan akibat beban mati *box girder* dapat dilihat pada Tabel 5.22 – Tabel 5.25 pada masing-masing variasi tinggi.

Tabel 5.22 Pembebanan akibat beban mati *box girder*  $h = 2,6$  m

Beban trotoar dan pagar tepi	11,58502	kN/m
Beban diafragma	7,9	kN/m
Beban median	0	kN/m
Beban mati tambahan (MA)	14,895	kN/m
Total beban, $Q_{MS}$	34,3800	kN/m

Tabel 5.23 Pembebanan akibat beban mati *box girder*  $h = 2,4$  m

Beban trotoar dan pagar tepi	11,58502	kN/m
Beban diafragma	7,110	kN/m
Beban median	0	kN/m
Beban mati tambahan (MA)	14,895	kN/m
Total beban, $Q_{MS}$	33,5900	kN/m

Tabel 5.24 Pembebanan akibat beban mati *box girder*  $h = 2,2$  m

Beban trotoar dan pagar tepi	11,58502	kN/m
Beban diafragma	6,320	kN/m
Beban median	0	kN/m
Beban mati tambahan (MA)	14,895	kN/m
Total beban, $Q_{MS}$	32,8000	kN/m

Tabel 5.25 Pembebanan akibat beban mati *box girder*  $h = 2$  m

Beban trotoar dan pagar tepi	11,58502	kN/m
Beban diafragma	5,53	kN/m
Beban median	0	kN/m
Beban mati tambahan (MA)	14,895	kN/m
Total beban, $Q_{MS}$	32,0100	kN/m

e. Total beban mati (MS) = 34,38 kN/m

$$M_{MS} = \frac{1}{8} \cdot M_s \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 34,38 \cdot 50^2 = 10743,7563 \text{ kNm}$$

Berikut dapat dilihat pada Tabel 5.26 hasil rekap momen total beban mati balok *box girder* pada variasi tinggi yang digunakan.

Tabel 5.26 Rekap momen total beban mati

$h$	2,6 m	2,4 m	2,2 m	2 m
$M_{MS}$ (kNm)	10743,7563	10496,8813	10250,0063	10003,1313

f. Momen akibat beban hidup lalu lintas,

Beban hidup ( $T_D$ ):

$$Q_{TD} = 39,6 \text{ kN/m}$$

$$P_{TD} = 68,6 \text{ kN}$$

$$M_{TD} = \frac{1}{8} \cdot Q_{TD} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P_{TD} \cdot L$$

$$= \frac{1}{8} \cdot 39,6 \cdot 50^2 + \frac{1}{4} \cdot 68,6 \cdot 50 = 13232,5 \text{ kNm}$$



Untuk hasil perhitungan momen di bagian lain dapat dilihat di Tabel 5.27

– Tabel 5.30 berikut:

Tabel 5.27 Perhitungan momen pada tinggi *box girder* 2,6 m

Beban (kN/m)	Momen Pada (kNm)		
	Tengah	Seperempat	Ujung
Berat gelagar (MG)	46457,8125	34843,3594	0
Beban mati (MD)	10743,7563	8057,8172	0
Beban hidup (ML)	13232,5000	10138,7500	0
$M_0 = MG + 50\%.MD =$	51829,6906	38872,2680	0
$MT = MG + MD + ML =$	70434,0688	53039,9266	0

Tabel 5.28 Perhitungan momen pada tinggi *box girder* 2,4 m

Beban (kN/m)	Momen Pada (kNm)		
	Tengah	Seperempat	Ujung
Berat gelagar (MG)	44545,3125	33408,9844	0
Beban mati (MD)	10496,8813	7872,6609	0
Beban hidup (ML)	13232,5000	10138,7500	0
$M_0 = MG + 50\%.MD =$	49793,7531	37345,3148	0
$MT = MG + MD + ML =$	68274,6938	51420,3953	0

Tabel 5.29 Perhitungan momen pada tinggi *box girder* 2,2 m

Beban (kN/m)	Momen Pada (kNm)		
	Tengah	Seperempat	Ujung
Berat gelagar (MG)	42632,8125	31974,6094	0
Beban mati (MD)	10250,0063	7687,5047	0
Beban hidup (ML)	13232,5000	10138,7500	0
$M_0 = MG + 50\%.MD =$	47757,8156	35818,3617	0
$MT = MG + MD + ML =$	66115,3188	49800,8641	0

Tabel 5.30 Perhitungan momen pada tinggi *box girder* 2 m

Beban (kN/m)	Momen Pada (kNm)		
	Tengah	Seperempat	Ujung
Berat gelagar (MG)	40720,3125	30540,2344	0
Beban mati (MD)	10003,1313	7502,3484	0

Lanjutan Tabel 5.30 Perhitungan momen pada tinggi *box girder* 2 m

Beban (kN/m)	Momen Pada (kNm)		
	Tengah	Seperempat	Ujung
Beban hidup (ML)	13232,5000	10138,7500	0
$M_0 = M_G + 50\% \cdot M_D =$	45721,8781	34291,4086	0
$MT = M_G + M_D + M_L =$	63955,9438	48181,3328	0

1) Batas bawah letak tendon :

$$a_{\min} = \frac{M_o}{P_i} \text{ dan } e_b = a_{\min} + k_b$$

Diasumsikan beban mati belum bekerja saat *transfer*, maka:

$$M_o = M_G = 51829,6906 \text{ kNm}$$

Jika diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton saat *transfer*, maka lebar daerah tendon bertambah besar:

$$e_b' = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot k_b}{P_i} \text{ dan } e_{b1} = e_b + e_b' = a_{\min} + k_b + e_b'$$

Untuk batas bawah letak tendon di bagian tengah bentang,

$$a_{\min} = \frac{M_o}{P_i} = \frac{51829,6906}{70893,8192} = 0,7311 \text{ m}$$

$$\text{dan } e_b = a_{\min} + k_b = 0,7311 + 0,657 = 1,3877 \text{ m}$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik:

$$e_b' = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot k_b}{P_i} = \frac{1577,9734 \cdot 5,83 \cdot 0,657}{70893,8192} = 0,0852 \text{ m dan,}$$

$$e_{b1} = e_b + e_b' = a_{\min} + k_b + e_b' = 0,7311 + 0,657 + 0,0852 = 1,4729 \text{ m}$$

Untuk hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.31 – Tabel 5.34 berikut

Tabel 5.31 Rekapitulasi hasil perhitungan batas bawah letak tendon  $h = 2,6$  meter

$h$ (m)	2,6											
$f'c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	0,8768	0,8135	0,7405	0,7986	0,7311	0,6745	0,7252	0,6728	0,6125	0,6641	0,6161	0,5609
seperempat bentang	0,6576	0,6101	0,5554	0,5990	0,5483	0,5059	0,5439	0,5046	0,4593	0,4980	0,4621	0,4206
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_b$ (m)												
tengah bentang	1,5334	1,4701	1,3971	1,4552	1,3877	1,3311	1,3817	1,3294	1,2690	1,3206	1,2727	1,2174
seperempat bentang	1,3142	1,2667	1,2120	1,2556	1,2049	1,1625	1,2005	1,1612	1,1159	1,1546	1,1187	1,0772
ujung	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566	0,6566
Terjadi Tarik												
$e_b$ (m)												
tengah bentang	0,0933	0,0865	0,0788	0,0918	0,0852	0,0776	0,0901	0,0836	0,0761	0,0882	0,0818	0,0745
seperempat bentang	0,0933	0,0865	0,0788	0,0918	0,0852	0,0776	0,0901	0,0836	0,0761	0,0882	0,0818	0,0745
ujung	0,0933	0,0865	0,0788	0,0918	0,0852	0,0776	0,0901	0,0836	0,0761	0,0882	0,0818	0,0745
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	1,6267	1,5567	1,4759	1,5470	1,4729	1,4087	1,4718	1,4130	1,3451	1,4088	1,3545	1,2919
seperempat bentang	1,4075	1,3533	1,2908	1,3474	1,2901	1,2400	1,2905	1,2448	1,1920	1,2428	1,2005	1,1517
ujung	0,7499	0,7431	0,7354	0,7484	0,7418	0,7341	0,7466	0,7401	0,7326	0,7448	0,7384	0,7310

Tabel 5.32 Rekapitulasi hasil perhitungan batas bawah letak tendon  $h = 2,4$  meter

$h$ (m)	2,4											
$f'c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	0,8400	0,7743	0,6985	0,7570	0,6978	0,6295	0,6987	0,6351	0,5810	0,6411	0,5909	0,5331
seperempat bentang	0,6300	0,5807	0,5238	0,5677	0,5233	0,4721	0,5240	0,4763	0,4357	0,4808	0,4432	0,3998
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_b$ (m)												
tengah bentang	1,4605	1,3948	1,3190	1,3775	1,3183	1,2500	1,3192	1,2556	1,2015	1,2616	1,2115	1,1536
seperempat bentang	1,2505	1,2012	1,1444	1,1883	1,1439	1,0927	1,1446	1,0968	1,0563	1,1013	1,0637	1,0203
ujung	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205	0,6205
Terjadi Tarik												
$e_b$ (m)												
tengah bentang	0,0843	0,0777	0,0701	0,0832	0,0767	0,0692	0,0818	0,0754	0,0680	0,0802	0,0740	0,0667
seperempat bentang	0,0843	0,0777	0,0701	0,0832	0,0767	0,0692	0,0818	0,0754	0,0680	0,0802	0,0740	0,0667
ujung	0,0843	0,0777	0,0701	0,0832	0,0767	0,0692	0,0818	0,0754	0,0680	0,0802	0,0740	0,0667
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	1,5448	1,4725	1,3891	1,4608	1,3950	1,3192	1,4010	1,3310	1,2696	1,3418	1,2854	1,2203
seperempat bentang	1,3348	1,2789	1,2145	1,2715	1,2206	1,1618	1,2264	1,1723	1,1243	1,1816	1,1377	1,0871
ujung	0,7048	0,6982	0,6906	0,7038	0,6972	0,6897	0,7023	0,6959	0,6886	0,7008	0,6945	0,6873

Tabel 5.33 Rekapitulasi hasil perhitungan batas bawah letak tendon  $h = 2,2$  meter

$h$ (m)	2,2											
$f'c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$Z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	0,8008	0,7323	0,6532	0,7241	0,6621	0,5907	0,6705	0,6043	0,5470	0,6166	0,5639	0,5030
seperempat bentang	0,6006	0,5492	0,4899	0,5431	0,4966	0,4430	0,5029	0,4532	0,4102	0,4625	0,4229	0,3773
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_b$ (m)												
tengah bentang	1,3819	1,3134	1,2344	1,3052	1,2433	1,1718	1,2516	1,1854	1,1281	1,1977	1,1450	1,0841
seperempat bentang	1,1817	1,1303	1,0711	1,1242	1,0777	1,0241	1,0840	1,0343	0,9914	1,0436	1,0040	0,9584
ujung	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811	0,5811
Terjadi Tarik												
$e_b$ (m)												
tengah bentang	0,0751	0,0687	0,0613	0,0744	0,0680	0,0607	0,0733	0,0670	0,0598	0,0721	0,0659	0,0588
seperempat bentang	0,0751	0,0687	0,0613	0,0744	0,0680	0,0607	0,0733	0,0670	0,0598	0,0721	0,0659	0,0588
ujung	0,0751	0,0687	0,0613	0,0744	0,0680	0,0607	0,0733	0,0670	0,0598	0,0721	0,0659	0,0588
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	1,4570	1,3821	1,2956	1,3796	1,3113	1,2325	1,3250	1,2524	1,1879	1,2698	1,2109	1,1430
seperempat bentang	1,2568	1,1990	1,1323	1,1986	1,1458	1,0848	1,1573	1,1014	1,0512	1,1157	1,0700	1,0172
ujung	0,6562	0,6498	0,6424	0,6555	0,6492	0,6418	0,6545	0,6482	0,6410	0,6532	0,6471	0,6399

Tabel 5.34 Rekapitulasi hasil perhitungan batas bawah letak tendon  $h = 2$  meter

$h$ (m)	2											
$f'c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$Z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	0,7586	0,6869	0,6041	0,6886	0,6235	0,5483	0,6401	0,5344	0,5097	0,5902	0,5344	0,4700
seperempat bentang	0,5690	0,5151	0,4530	0,5165	0,4676	0,4112	0,4801	0,4008	0,3823	0,4427	0,4008	0,3525
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_b$ (m)												
tengah bentang	1,2966	1,2248	1,1420	1,2265	1,1614	1,0862	1,1781	1,0724	1,0476	1,1282	1,0724	1,0079
seperempat bentang	1,1069	1,0531	0,9910	1,0544	1,0055	0,9492	1,0180	0,9388	0,9202	0,9806	0,9388	0,8904
ujung	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379	0,5379
Terjadi Tarik												
$e_b$ (m)												
tengah bentang	0,0657	0,0595	0,0523	0,0653	0,0591	0,0520	0,0646	0,0577	0,0514	0,0637	0,0577	0,0507
seperempat bentang	0,0657	0,0595	0,0523	0,0653	0,0591	0,0520	0,0646	0,0577	0,0514	0,0637	0,0577	0,0507
ujung	0,0657	0,0595	0,0523	0,0653	0,0591	0,0520	0,0646	0,0577	0,0514	0,0637	0,0577	0,0507
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	1,3623	1,2843	1,1943	1,2919	1,2206	1,1383	1,2427	1,1300	1,0991	1,1919	1,1300	1,0586
seperempat bentang	1,1726	1,1126	1,0433	1,1197	1,0647	1,0012	1,0826	0,9964	0,9717	1,0443	0,9964	0,9411
ujung	0,6036	0,5974	0,5903	0,6033	0,5971	0,5900	0,6025	0,5956	0,5894	0,6016	0,5956	0,5886

2) Batas atas letak tendon:

$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_e} \text{ dan } e_t = a_{\max} - k_t$$

$$M_T = 70434,0688 \text{ kNm}$$

Jika diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton saat layan, maka lebar daerah tendon bertambah sebesar:

$$e_t' = \frac{f_{ts} \cdot A_c \cdot k_t}{P_e} \text{ dan } e_{t1} = e_t - e_t' = a_{\max} - k_t + e_t'$$

Untuk batas atas letak tendon di bagian tengah bentang,

$$a_{\max} = \frac{M_T}{P_e} = \frac{70434,0688}{53170,3644} = 1,3247 \text{ m}$$

$$\text{dan } e_t = a_{\max} - k_t = 1,3247 - 0,517 = 0,8077 \text{ m}$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik:

$$e_t' = \frac{f_{ts} \cdot A_c \cdot k_t}{P_e} = \frac{3,5285 \cdot 5,83 \cdot 0,517}{53170,3644} = 0,0002 \text{ m, dan}$$

$$e_{t1} = e_t - e_t' = a_{\max} - k_t - e_t' = 1,3247 - 0,517 - 0,0002 = 0,8075 \text{ m}$$

Untuk hasil selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.35 – Tabel 5.38 berikut.

Tabel 5.35 Rekapitulasi hasil perhitungan batas atas letak tendon  $h = 2,6$  meter

$h$ (m)	2,6											
$f_c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$Z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	1,5887	1,4741	1,3418	1,4002	1,3247	1,1826	1,2714	1,1796	1,0738	1,2440	1,0802	1,0653
seperempat bentang	1,1964	1,1100	1,0104	1,0543	0,9975	0,8905	0,9573	0,8882	0,8085	0,9367	0,8134	0,8021
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_t$ (m)												
tengah bentang	1,0717	0,9570	0,8248	0,8832	0,8077	0,6656	0,7544	0,6626	0,5568	0,7270	0,5632	0,5483
seperempat bentang	0,6793	0,5930	0,4934	0,5373	0,4805	0,3735	0,4403	0,3712	0,2915	0,4197	0,2964	0,2851
ujung	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170	-0,5170
Terjadi Tarik												
$e_t$ (m)												
tengah bentang	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
seperempat bentang	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
ujung	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	1,0715	0,9568	0,8246	0,8830	0,8075	0,6654	0,7542	0,6624	0,5566	0,7268	0,5631	0,5481
seperempat bentang	0,6791	0,5928	0,4932	0,5371	0,4803	0,3733	0,4401	0,3711	0,2914	0,4195	0,2962	0,2849
ujung	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172	-0,5172



Tabel 5.36 Rekapitulasi hasil perhitungan batas atas letak tendon  $h = 2,4$  meter

$h$ (m)	2,4											
$f_c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$Z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	1,4765	1,3611	1,2278	1,3307	1,2266	1,1065	1,2360	1,1164	1,0834	1,1341	1,0454	1,0077
seperempat bentang	1,1120	1,0251	0,9247	1,0022	0,9238	0,8334	0,9308	0,8408	0,8159	0,8541	0,7873	0,7588
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_t$ (m)												
tengah bentang	0,9917	0,8762	0,7430	0,8459	0,7418	0,6217	0,7512	0,6315	0,5985	0,6493	0,5606	0,5228
seperempat bentang	0,6272	0,5402	0,4399	0,5174	0,4390	0,3485	0,4460	0,3559	0,3310	0,3692	0,3024	0,2740
ujung	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849	-0,4849
Terjadi Tarik												
$e_t$ (m)												
tengah bentang	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
seperempat bentang	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
ujung	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	0,9915	0,8760	0,7428	0,8457	0,7416	0,6215	0,7510	0,6314	0,5984	0,6491	0,5604	0,5226
seperempat bentang	0,6270	0,5400	0,4397	0,5172	0,4388	0,3484	0,4458	0,3558	0,3309	0,3690	0,3023	0,2738
ujung	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850	-0,4850

Tabel 5.37 Rekapitulasi hasil perhitungan batas atas letak tendon  $h = 2,2$  meter

$h$ (m)	2,2											
$f_c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$Z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	1,4781	1,3517	1,2058	1,3365	1,2222	1,0903	1,2625	1,1154	1,0299	1,1769	1,0762	0,9601
seperempat bentang	1,1134	1,0181	0,9083	1,0067	0,9206	0,8213	0,9509	0,8401	0,7757	0,8864	0,8106	0,7231
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_t$ (m)												
tengah bentang	1,0276	0,9012	0,7553	0,8861	0,7717	0,6398	0,8120	0,6649	0,5794	0,7264	0,6258	0,5096
seperempat bentang	0,6629	0,5677	0,4578	0,5563	0,4701	0,3708	0,5004	0,3897	0,3252	0,4359	0,3601	0,2726
ujung	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505	-0,4505
Terjadi Tarik												
$e_t$ (m)												
tengah bentang	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001
seperempat bentang	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001
ujung	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001	0,0002	0,0002	0,0001
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	1,0275	0,9010	0,7552	0,8859	0,7716	0,6397	0,8118	0,6647	0,5793	0,7263	0,6256	0,5095
seperempat bentang	0,6627	0,5675	0,4576	0,5561	0,4700	0,3706	0,5002	0,3895	0,3251	0,4358	0,3600	0,2725
ujung	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506	-0,4506

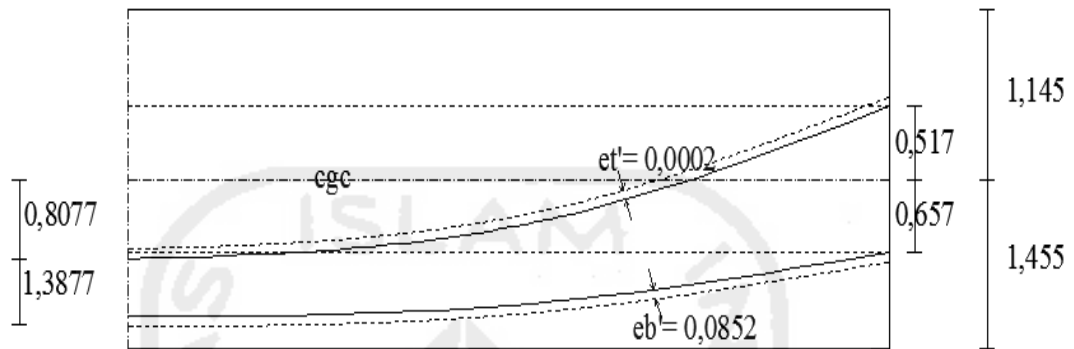
Tabel 5.38 Rekapitulasi hasil perhitungan batas atas letak tendon  $h = 2$  meter

$h$ (m)	2											
$f_c$ (MPa)	41,5			49,8			58,1			66,4		
$Z_o$ (m)	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45	0,17	0,3	0,45
Tidak Terjadi Tarik												
$a_{min}$ (m)												
tengah bentang	1,4536	1,3161	1,1575	1,3195	1,1947	1,0506	1,2179	1,0937	0,9830	1,1384	1,0307	0,9064
seperempat bentang	1,0951	0,9915	0,8720	0,9940	0,9000	0,7915	0,9174	0,8240	0,7405	0,8575	0,7764	0,6828
ujung	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
$e_t$ (m)												
tengah bentang	1,0400	0,9025	0,7438	0,9058	0,7810	0,6370	0,8042	0,6801	0,5694	0,7247	0,6170	0,4928
seperempat bentang	0,6815	0,5779	0,4583	0,5804	0,4864	0,3779	0,5037	0,4103	0,3268	0,4439	0,3627	0,2691
ujung	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137	-0,4137
Terjadi Tarik												
$e_t$ (m)												
tengah bentang	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
seperempat bentang	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
ujung	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0002	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
$e_{b1}$ (m)												
tengah bentang	1,0398	0,9023	0,7437	0,9057	0,7809	0,6369	0,8041	0,6799	0,5692	0,7246	0,6169	0,4927
seperempat bentang	0,6813	0,5777	0,4582	0,5802	0,4862	0,3777	0,5036	0,4102	0,3267	0,4437	0,3626	0,2690
ujung	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138	-0,4138

Eksentrisitas tengah bentang aktual yang diasumsikan,

$$e_t = 0,8077 \text{ m} < e_s = 1,1546 \text{ m} < e_b = 1,3877 \text{ m} \rightarrow \text{OK}$$

Jadi gambaran tendon di tengah bentang dapat dilihat pada Gambar 5.11.



Gambar 5.11 Daerah aman tendon

### 5.2.5. Perhitungan Jumlah Tendon

Pada perhitungan tendon ini digunakan kabel yang terdiri dari beberapa kawat baja untaian “*Strands cable*” standar VSL, dengan data pada Tabel 5.39 sebagai berikut:

Tabel 5.39 Data *strands cable*

DATA STRANDS CABLE - STANDAR VSL			
Jenis <i>strands</i>		Uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270	
Tegangan leleh <i>strand</i>	$f_{py} =$	1581	MPa
Kuat tarik <i>strand</i>	$f_{pu} =$	1860	MPa
Diameter nominal <i>strands</i>		12,7	mm (1/2")
Luas tampang nominal satu <i>strands</i>	$A_{st} =$	126,67	mm <sup>2</sup>
Beban putus minimal satu <i>strands</i>	$P_{bs} =$	183,7	kN
Jumlah kawat untaian ( <i>strands cable</i> )		20	kawat untaian tiap tendon
Diameter selubung ideal		76,2	mm
Luas tampang <i>strands</i>		1974	mm <sup>2</sup>
Beban putus satu tendon	$P_{b1} =$	3674	kN
Modulus elastis <i>strands</i>	$E_s =$	190000	MPa
Tipe dongkrak		VSL E 19	

## 1. Jumlah tendon

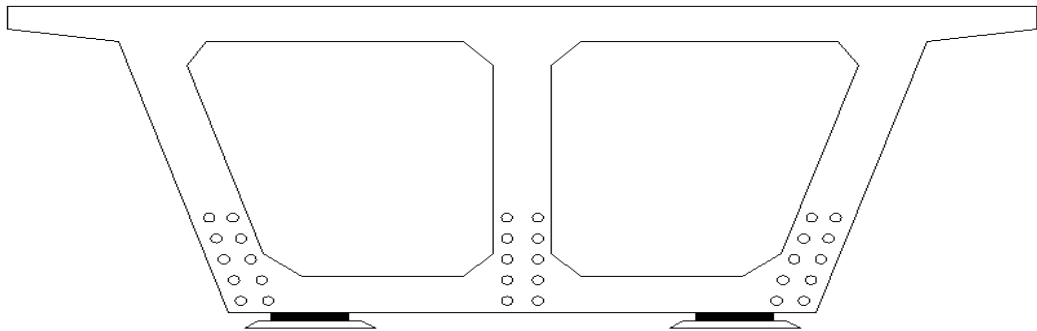
- a. Gaya prategang awal,  $P_t = 70893,819$  kN
- b. Kuat tarik *strand*,  $f_{pu} = 1860$  MPa
- c. Tegangan leleh *strand*,  $f_{py} = 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1860 = 1581$  MPa
- d. Tegangan ijin tendon sesaat setelah transfer,
- e.  $f_{pi} = 0,74 \cdot f_{pu} = 0,74 \cdot 1860 = 1376,40$  MPa
- f.  $f_{pi} = 0,82 \cdot f_{py} = 0,82 \cdot 1581 = 1296,42$  MPa
- g. Karena  $0,82 \cdot f_{py} = 1296,42$  MPa  $<$   $0,74 \cdot f_{pu} = 1376,4$  MPa, maka digunakan tegangan ijin tendon sesaat setelah transfer  $f_{pu} = 1296,42$  MPa
- h. Luas area baja prategang yang diperlukan,
 
$$A_s = \frac{P_t}{f_{pi}} = \frac{70893,819}{1296,42 \cdot 10^3} = 54684,2992 \text{ mm}^2$$
- i. Jumlah kawat untaian (*strands cable*) = 20 kawat untaian tiap tendon
- j. Beban putus minimum 1 tendon,
 
$$P_{b1} = P_{bs1} \cdot \text{jumlah strands per tendon}$$

$$= 183,7 \cdot 20 = 3674 \text{ kN}$$
- k. Jumlah tendon yang diperlukan,
 
$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,8 \cdot P_{b1}}$$

$$= \frac{70893,819}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 3674}$$

$$= 28,377 \text{ tendon}$$
- l. Jumlah tendon aktual yang digunakan,
 
$$n_t = 30 \text{ tendon}$$

Tendon berjumlah 30 pada *box girder* dengan susunan 3 baris. tiap baris berjumlah 5 tendon tiap baris seperti terlihat pada Gambar 5.12 sebagai berikut.



Gambar 5.12 Susunan tendon pada *box girder* di tengah bentang

Digunakan jumlah *strands* dengan susunan seperti pada Tabel 5.40 berikut.

Tabel 5.40 Jumlah *strands* *box girder*  $h = 2,6$  m,  $f'c = 49,8$  MPa dan  $z_0 = 0,3$  m

$n_{s1} =$	6	tendon	20	<i>strands</i> /tendon =	120	<i>strands</i> dg selubung tendon =	76,2	mm
$n_{s2} =$	6	tendon	20	<i>strands</i> /tendon =	120	<i>strands</i> dg selubung tendon =	76,2	mm
$n_{s3} =$	6	tendon	20	<i>strands</i> /tendon =	120	<i>strands</i> dg selubung tendon =	76,2	mm
$n_{s4} =$	6	tendon	20	<i>strands</i> /tendon =	120	<i>strands</i> dg selubung tendon =	76,2	mm
$n_{s5} =$	6	tendon	20	<i>strands</i> /tendon =	120	<i>strands</i> dg selubung tendon =	76,2	mm
$n_t =$	30	tendon	Jumlah <i>strands</i> , $n_s =$		600	<i>strands</i>		

m. Luas aktual area baja prategang yang digunakan dalam desain

$$A_{ps} = n_s \cdot A_{st} = 600 \cdot 126,6769 = 76006,1219 \text{ mm}^2 > A_s = 54684,3 \text{ mm}^2$$

n. Beban satu tendon,

$$P_{1tendon} = \frac{P_t}{n_t} = \frac{70893,819}{30} = 2363,127 \text{ kN}$$

o. Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (% *jacking force*):

$$P_o = \frac{P_t}{0,85 \cdot n_s \cdot P_{bs}} = \frac{70893,819}{0,85 \cdot 600 \cdot 183,7} = 75,671 \% < 80 \% \quad \text{OK}$$

p. Gaya prategang (aktual) yang terjadi akibat *jacking*:

$$P_j = p_o \cdot (n_t \cdot P_{bt}) = 75,671 \% \cdot 30 \cdot 7348 = 83404,4931 \text{ kN}$$

q. Tegangan baja prategang saat *jacking*,

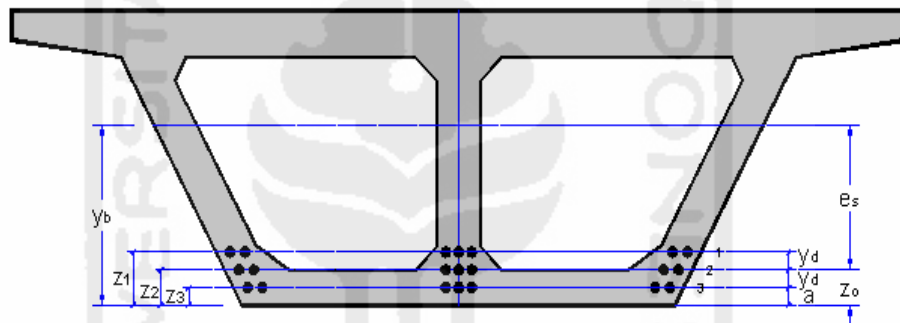
$$f_{pj} = \frac{P_j}{A_{ps}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{83404,4931 \cdot 10^3}{76006,1219} \\
 &= 1097,3391 \text{ MPa} < 0,80 \cdot f_{pu} = 1581 \text{ Mpa} && \text{OK} \\
 & < 0,94 \cdot f_{py} = 1860 \text{ Mpa} && \text{OK}
 \end{aligned}$$

### 5.2.6. Tata Letak Posisi Tendon (*Lay Out Tendon*)

Perencanaan tata letak tendon dilakukan dengan peninjauan pada tengah bentang dan pada ujung balok atau pada tumpuan. (lihat Gambar 5.13)

#### 1. Posisi Tendon di Tengah Bentang



Gambar 5.13 Posisi tendon di tengah bentang

Ditetapkan jarak dari alas balok ke as baris tendon ke-1,  $a = 0,15 \text{ m}$

Jarak dari alas ke titik berat tendon,  $z_o = 0,3 \text{ m}$

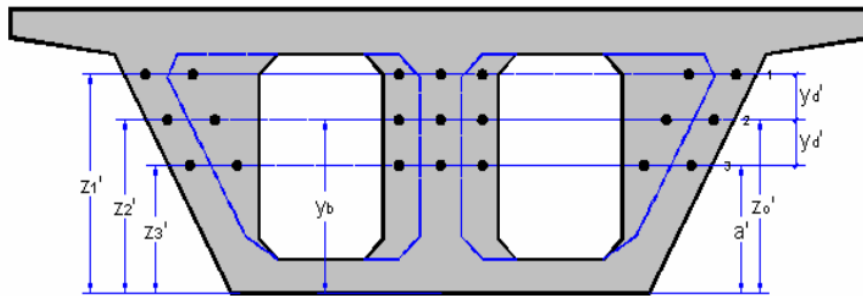
Jarak vertikal antara as ke as tendon,  $y_d = (z_o - a)$

$$= (0,3 - 0,15) = 0,15 \text{ m}$$

Jarak masing-masing baris tendon terhadap alas,

Baris 1	: $z_1$	= $a + 4 \cdot y_d$	= $0,15 + 4 \cdot 0,15$	= $0,75 \text{ m}$
Baris 2	: $z_2$	= $a + 3 \cdot y_d$	= $0,15 + 3 \cdot 0,15$	= $0,6 \text{ m}$
Baris 3	: $z_3$	= $a + 2 \cdot y_d$	= $0,15 + 2 \cdot 0,15$	= $0,45 \text{ m}$
Baris 4	: $z_4$	= $a + y_d$	= $0,15 + 0,15$	= $0,3 \text{ m}$
Baris 5	: $z_5$	= $a$	= $0,15 + 0,15$	= $0,15 \text{ m}$

## 2. Posisi tendon di tumpuan (lihat Gambar 5.14)



Gambar 5.14 Posisi tendon di tumpuan

Ditetapkan jarak antar tendon,  $y_d' = 0,25$  m

Jarak tendon bawah terhadap alas,  $a' = c_b - y_d' = 1,455 - 0,25 = 1,2046$  m

Jarak masing-masing baris tendon terhadap alas,

$$\text{Baris 1} \quad : z_1' = a' + 4 \cdot y_d' = 1,2046 + 4 \cdot 0,25 = 2,2046 \text{ m}$$

$$\text{Baris 2} \quad : z_2' = a' + 3 \cdot y_d' = 1,2046 + 3 \cdot 0,25 = 1,9546 \text{ m}$$

$$\text{Baris 3} \quad : z_3' = a' + 2 \cdot y_d' = 1,2046 + 2 \cdot 0,25 = 1,7046 \text{ m}$$

$$\text{Baris 4} \quad : z_4' = a' + y_d' = 1,2046 + 0,25 = 1,4546 \text{ m}$$

$$\text{Baris 5} \quad : z_5' = a' = 1,2046 = 1,2046 \text{ m}$$

## 3. Eksentrisitas masing-masing tendon

$$\text{Baris 1} \quad : f_1 = z_1' - z_1 = 2,2046 - 0,75 = 1,4546 \text{ m}$$

$$\text{Baris 2} \quad : f_2 = z_2' - z_2 = 1,9546 - 0,6 = 1,3546 \text{ m}$$

$$\text{Baris 3} \quad : f_3 = z_3' - z_3 = 1,7046 - 0,45 = 1,2546 \text{ m}$$

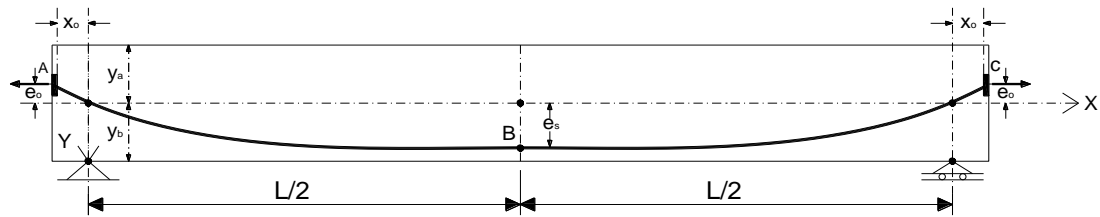
$$\text{Baris 4} \quad : f_4 = z_4' - z_4 = 1,4546 - 0,3 = 1,1546 \text{ m}$$

$$\text{Baris 5} \quad : f_5 = z_5' - z_5 = 1,2046 - 0,15 = 1,0546 \text{ m}$$

4. Lintasan inti tendon (*cable*)

Berikut Gambar 5.15 adalah contoh gambar lintasan tendon dari ujung ke ujung pada struktur beton prategang.





Gambar 5.15 Lintasan inti tendon

Panjang *box girder*,  $L = 50$  m

Eksentrisitas,  $e_s = 1,1546$  m

Persamaan lintasan tendon  $Y = 4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot (L - X)$  dengan  $f = e_s$  untuk hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.41 – Tabel 5.43 berikut:

Tabel 5.41 Perhitungan lintasan inti tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_o = 0,3$  m

X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
-0,25	-0,0232	19	1,0881	39	0,7925
0	0,0000	20	1,1084	40	0,7390
1	0,0905	21	1,1251	41	0,6817
2	0,1773	22	1,1380	42	0,6207
3	0,2605	23	1,1472	43	0,5561
4	0,3399	24	1,1528	44	0,4877
5	0,4157	25	1,1546	45	0,4157
6	0,4877	26	1,1528	46	0,3399
7	0,5561	27	1,1472	47	0,2605
8	0,6207	28	1,1380	48	0,1773
9	0,6817	29	1,1251	49	0,0905
10	0,7390	30	1,1084	50	0,0000
11	0,7925	31	1,0881	0,25	0,0230
12	0,8424	32	1,0641		0
13	0,8886	33	1,0364		0
14	0,9311	34	1,0050		0
15	0,9699	35	0,9699		0
16	1,0050	36	0,9311		0
17	1,0364	37	0,8886		0
18	1,0641	38	0,8424		0

Tabel 5.42 Perhitungan lintasan tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_o = 0,17$  m

X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
-0,25	-0,0258	19	1,2106	39	0,8818
0	0,0000	20	1,2332	40	0,8222
1	0,1007	21	1,2517	41	0,7584
2	0,1973	22	1,2661	42	0,6906
3	0,2898	23	1,2764	43	0,6187
4	0,3782	24	1,2826	44	0,5426
5	0,4625	25	1,2846	45	0,4625
6	0,5426	26	1,2826	46	0,3782
7	0,6187	27	1,2764	47	0,2898
8	0,6906	28	1,2661	48	0,1973
9	0,7584	29	1,2517	49	0,1007
10	0,8222	30	1,2332	50	0,0000
11	0,8818	31	1,2106	0,25	0,0256
12	0,9373	32	1,1839		0
13	0,9886	33	1,1531		0
14	1,0359	34	1,1181		0
15	1,0791	35	1,0791		0
16	1,1181	36	1,0359		0
17	1,1531	37	0,9886		0
18	1,1839	38	0,9373		0

Tabel 5.43 Perhitungan lintasan tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_o = 0,45$  m

X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
-0,25	-0,0202	19	0,9468	39	0,6896
0	0,0000	20	0,9644	40	0,6430
1	0,0788	21	0,9789	41	0,5931
2	0,1543	22	0,9902	42	0,5401
3	0,2266	23	0,9982	43	0,4838
4	0,2958	24	1,0030	44	0,4244
5	0,3617	25	1,0046	45	0,3617
6	0,4244	26	1,0030	46	0,2958
7	0,4838	27	0,9982	47	0,2266
8	0,5401	28	0,9902	48	0,1543
9	0,5931	29	0,9789	49	0,0788
10	0,6430	30	0,9644	50	0,0000
11	0,6896	31	0,9468	0,25	0,0200
12	0,7330	32	0,9259		0
13	0,7732	33	0,9017		0
14	0,8101	34	0,8744		0
15	0,8439	35	0,8439		0
16	0,8744	36	0,8101		0
17	0,9017	37	0,7732		0
18	0,9259	38	0,7330		0

$$X_0 = 0,25 \text{ m}$$

$$e_0 = 0,0230 \text{ m}$$

$$\text{Jarak AB} = \text{jarak BC} = \frac{L}{2} + x_0 = \frac{50}{2} + 0,25 = 25,25 \text{ m}$$

$$e_s + e_0 = 1,1546 + 0,0230 = 1,1776 \text{ m}$$

$$\alpha_{AB} = \alpha_{BC} = \frac{2 \cdot (e_s + e_0)}{\left(\frac{L}{2} + x_0\right)} = \frac{2 \cdot 1,1776}{25,25} = 0,0933 \text{ rad}$$

5. Sudut angkur

$$\text{Persamaan lintasan tendon, } Y = 4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot (L - X)$$

$$\frac{dY}{dX} = 4 \cdot f_i \cdot \left(\frac{L - 2 \cdot X}{L}\right)$$

$$\text{Untuk } X = 0 \text{ (posisi angkur di tumpuan), maka } \frac{dY}{dX} = \frac{4 \cdot f_i}{L}$$

Persamaan sudut angkur,  $\alpha = \text{ATAN}(dY/dX)$ . Hasil dari perhitungan sudut angkur dapat dilihat pada Tabel 5.44 – Tabel 5.46.

Tabel 5.44 Sudut angkur  $h = 2,6 \text{ m}$  dan  $z_0 = 0,3 \text{ m}$

No	Jml Strands	D Selubung	Eksentrisitas $f_i$ (m)	$dY/dX = 4 \cdot f_i/L$	Sudut Angkur $\alpha = \text{ATAN}(dY/dX)$				
					$\alpha_1 =$		rad		$^\circ$
1	120	76,2	1,4546	0,1164	$\alpha_1 =$	0,1158	rad	6,6376	$^\circ$
2	120	76,2	1,3546	0,1084	$\alpha_2 =$	0,1079	rad	6,1850	$^\circ$
3	120	76,2	1,2546	0,1004	$\alpha_3 =$	0,1000	rad	5,7315	$^\circ$
4	120	76,2	1,1546	0,0924	$\alpha_4 =$	0,0921	rad	5,2774	$^\circ$
5	120	76,2	1,0546	0,0844	$\alpha_5 =$	0,0842	rad	4,8226	$^\circ$

Tabel 5.45 Sudut angkur  $h = 2,6 \text{ m}$  dan  $z_0 = 0,17 \text{ m}$

No	Jml Strands	D Selubung	Eksentrisitas $f_i$ (m)	$dY/dX = 4 \cdot f_i/L$	Sudut Angkur $\alpha = \text{ATAN}(dY/dX)$				
					$\alpha_1 =$		rad		$^\circ$
1	140	76,2	2,0446	0,1636	$\alpha_1 =$	0,1621	rad	9,2896	$^\circ$
2	140	76,2	1,6646	0,1332	$\alpha_2 =$	0,1324	rad	7,5854	$^\circ$
3	140	76,2	1,2846	0,1028	$\alpha_3 =$	0,1024	rad	5,8677	$^\circ$
4	140	76,2	0,9046	0,0724	$\alpha_4 =$	0,0722	rad	4,1392	$^\circ$

Tabel 5.46 Sudut angkur  $h = 2,6$  m dan  $z_0 = 0,45$  m

No	Jml <i>Strands</i>	D Selubung	Eksentrisitas $f_i$ (m)	$dY/dX =$ $4 \cdot f_i / L$	Sudut Angkur $\alpha = \text{ATAN}(dY/dX)$				
					$\alpha_1 =$		rad		$^\circ$
1	140	76,2	1,2046	0,0964	$\alpha_1 =$	0,0961	rad	5,5046	$^\circ$
2	140	76,2	1,1046	0,0884	$\alpha_2 =$	0,0881	rad	5,0501	$^\circ$
3	140	76,2	1,0046	0,0804	$\alpha_3 =$	0,0802	rad	4,5949	$^\circ$
4	140	76,2	0,9046	0,0724	$\alpha_4 =$	0,0722	rad	4,1392	$^\circ$

## 6. Tata letak kabel tendon

Panjang jembatan,  $L = 50$  m

$$f_0 = e_s = 1,1546 \text{ m dan } c_b = 1,4546 \text{ m}$$

$$f_1 = 1,4546 \text{ m}; f_2 = 1,3546 \text{ m}; f_3 = 1,2546 \text{ m}; f_4 = 1,1546 \text{ m}; f_5 = 1,0546 \text{ m}$$

Posisi masing-masing kabel:

$$z_i = z_i' - 4 \cdot f_i \cdot \frac{X}{L^2} \cdot (L - X)$$

Untuk hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.47 – Tabel 5.49 berikut.

Tabel 5.47 Tata letak kabel tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_0 = 0,3$  m

Jarak X (m)	Trace $z_0$ (m)	Posisi Baris Tendon				
		$z_1$ (m)	$z_2$ (m)	$z_3$ (m)	$z_3$ (m)	$z_3$ (m)
0	1,9546	2,2046	1,9546	1,7046	1,4546	1,2046
1	1,8484	2,0906	1,8484	1,6063	1,3641	1,1219
2	1,7465	1,9812	1,7465	1,5119	1,2773	1,0426
3	1,6490	1,8765	1,6490	1,4216	1,1941	0,9667
4	1,5558	1,7764	1,5558	1,3353	1,1147	0,8941
5	1,4670	1,6810	1,4670	1,2530	1,0390	0,8250
6	1,3824	1,5902	1,3824	1,1747	0,9669	0,7591
7	1,3022	1,5041	1,3022	1,1004	0,8986	0,6967
8	1,2264	1,4226	1,2264	1,0301	0,8339	0,6377
9	1,1549	1,3458	1,1549	0,9639	0,7729	0,5820
10	1,0877	1,2737	1,0877	0,9017	0,7157	0,5297
11	1,0248	1,2062	1,0248	0,8434	0,6621	0,4807
12	0,9663	1,1433	0,9663	0,7892	0,6122	0,4352
13	0,9121	1,0851	0,9121	0,7391	0,5660	0,3930
14	0,8623	1,0316	0,8623	0,6929	0,5235	0,3542
15	0,8167	0,9827	0,8167	0,6507	0,4847	0,3187
16	0,7756	0,9385	0,7756	0,6126	0,4496	0,2867
17	0,7387	0,8990	0,7387	0,5785	0,4182	0,2580

Lanjutan Tabel 5.47 Tata letak kabel tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_0 = 0,3$  m

Jarak X (m)	Trace $z_0$ (m)	Posisi Baris Tendon				
		$z_1$ (m)	$z_2$ (m)	$z_3$ (m)	$z_3$ (m)	$z_3$ (m)
18	0,7062	0,8640	0,7062	0,5484	0,3905	0,2327
19	0,6780	0,8338	0,6780	0,5223	0,3665	0,2107
20	0,6542	0,8082	0,6542	0,5002	0,3462	0,1922
21	0,6347	0,7872	0,6347	0,4821	0,3296	0,1770
22	0,6195	0,7709	0,6195	0,4681	0,3166	0,1652
23	0,6087	0,7593	0,6087	0,4580	0,3074	0,1567
24	0,6022	0,7523	0,6022	0,4520	0,3018	0,1517
25	0,6000	0,7500	0,6000	0,4500	0,3000	0,1500

Tabel 5.48 Tata letak kabel tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_0 = 0,17$  m

Jarak X (m)	Trace $z_0$ (m)	Posisi Baris Tendon			
		$z_1$ (m)	$z_2$ (m)	$z_3$ (m)	$z_4$ (m)
0	1,8546	2,2546	1,8546	1,4546	1,0546
1	1,7241	2,0943	1,7241	1,3539	0,9837
2	1,5989	1,9406	1,5989	1,2573	0,9157
3	1,4791	1,7934	1,4791	1,1648	0,8505
4	1,3646	1,6527	1,3646	1,0764	0,7883
5	1,2554	1,5186	1,2554	0,9922	0,7290
6	1,1515	1,3910	1,1515	0,9120	0,6725
7	1,0529	1,2699	1,0529	0,8359	0,6190
8	0,9597	1,1554	0,9597	0,7640	0,5683
9	0,8718	1,0475	0,8718	0,6962	0,5205
10	0,7893	0,9461	0,7893	0,6325	0,4757
11	0,7120	0,8512	0,7120	0,5729	0,4337
12	0,6401	0,7629	0,6401	0,5174	0,3946
13	0,5735	0,6811	0,5735	0,4660	0,3584
14	0,5123	0,6058	0,5123	0,4187	0,3251
15	0,4563	0,5371	0,4563	0,3755	0,2947
16	0,4057	0,4750	0,4057	0,3365	0,2672
17	0,3605	0,4194	0,3605	0,3015	0,2426
18	0,3205	0,3703	0,3205	0,2707	0,2209
19	0,2859	0,3278	0,2859	0,2440	0,2021
20	0,2566	0,2918	0,2566	0,2214	0,1862
21	0,2326	0,2623	0,2326	0,2029	0,1732
22	0,2140	0,2394	0,2140	0,1885	0,1630
23	0,2007	0,2231	0,2007	0,1782	0,1558
24	0,1927	0,2133	0,1927	0,1721	0,1514
25	0,1900	0,2100	0,1900	0,1700	0,1500

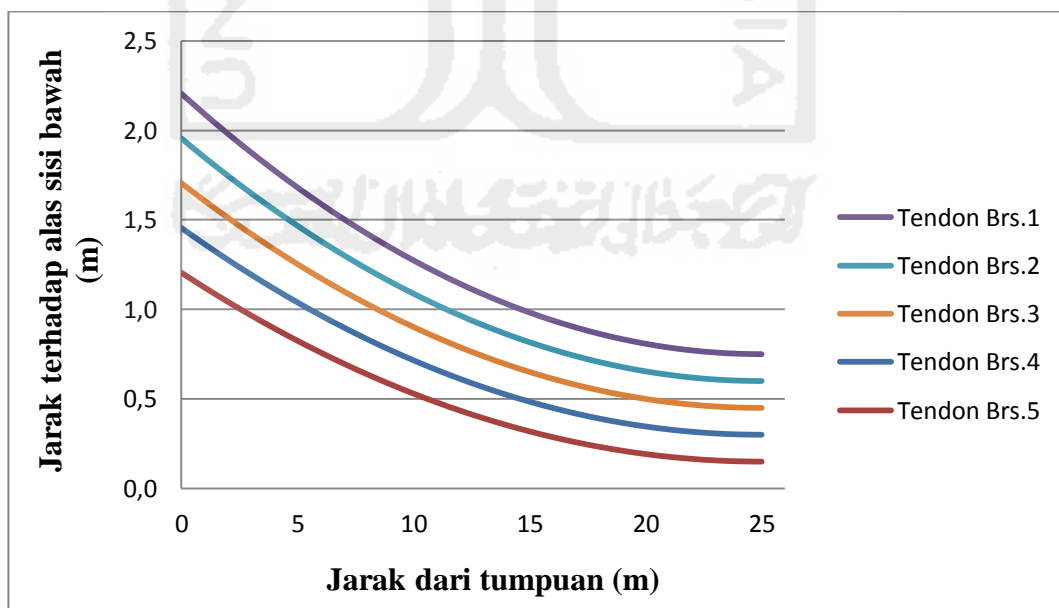
Tabel 5.49 Tata letak kabel tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_0 = 0,45$  m

Jarak X (m)	Trace $z_0$ (m)	Posisi Baris Tendon			
		$z_1$ (m)	$z_2$ (m)	$z_3$ (m)	$z_4$ (m)
0	1,8546	2,2546	1,8546	1,4546	1,0546
1	1,7680	2,1602	1,7680	1,3759	0,9837
2	1,6849	2,0696	1,6849	1,3003	0,9157
3	1,6054	1,9829	1,6054	1,2280	0,8505
4	1,5294	1,9000	1,5294	1,1589	0,7883

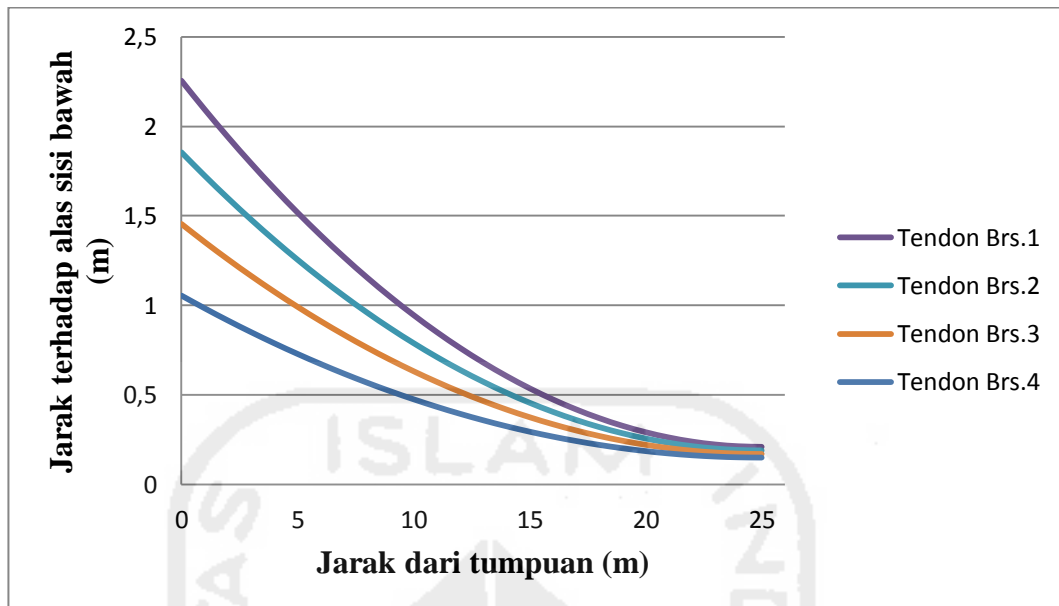
Lanjutan Tabel 5.49 Tata letak kabel tendon  $h = 2,6$  m dan  $z_0 = 0,45$  m

Jarak X (m)	Trace $z_0$ (m)	Posisi Baris Tendon			
		$z_1$ (m)	$z_2$ (m)	$z_3$ (m)	$z_4$ (m)
5	1,4570	1,8210	1,4570	1,0930	0,7290
6	1,3880	1,7458	1,3880	1,0303	0,6725
7	1,3226	1,6745	1,3226	0,9708	0,6190
8	1,2608	1,6070	1,2608	0,9145	0,5683
9	1,2025	1,5434	1,2025	0,8615	0,5205
10	1,1477	1,4837	1,1477	0,8117	0,4757
11	1,0964	1,4278	1,0964	0,7650	0,4337
12	1,0487	1,3757	1,0487	0,7216	0,3946
13	1,0045	1,3275	1,0045	0,6815	0,3584
14	0,9639	1,2832	0,9639	0,6445	0,3251
15	0,9267	1,2427	0,9267	0,6107	0,2947
16	0,8932	1,2061	0,8932	0,5802	0,2672
17	0,8631	1,1734	0,8631	0,5529	0,2426
18	0,8366	1,1444	0,8366	0,5288	0,2209
19	0,8136	1,1194	0,8136	0,5079	0,2021
20	0,7942	1,0982	0,7942	0,4902	0,1862
21	0,7783	1,0808	0,7783	0,4757	0,1732
22	0,7659	1,0673	0,7659	0,4645	0,1630
23	0,7571	1,0577	0,7571	0,4564	0,1558
24	0,7518	1,0519	0,7518	0,4516	0,1514
25	0,7500	1,0500	0,7500	0,4500	0,1500

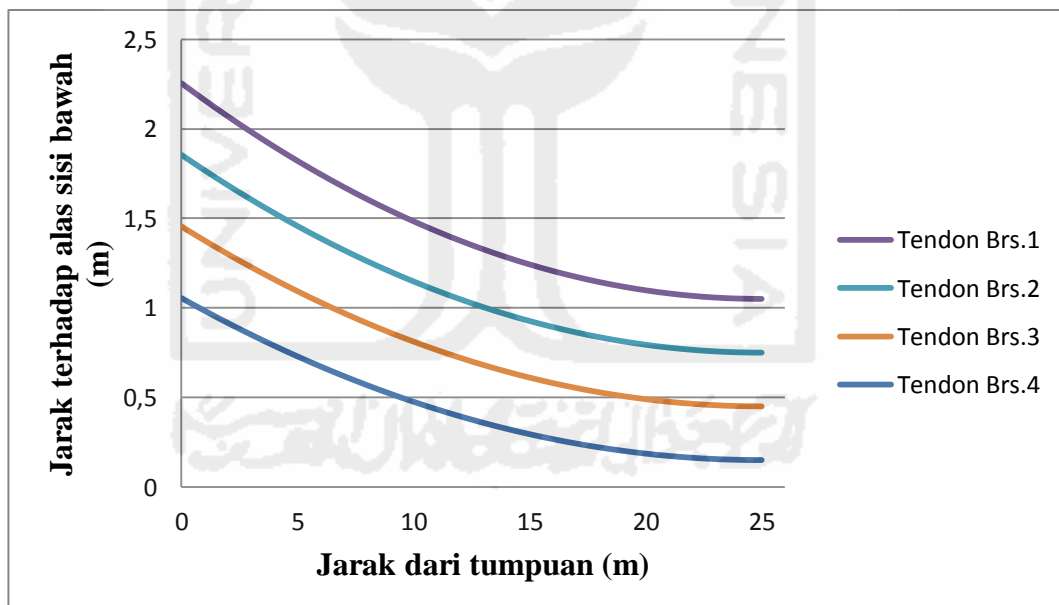
Berikut dapat dilihat pada Gambar 5.16 – Gambar 5.18 lintasan tendon yang terjadi pada berbagai variasi eksentrisitas yang digunakan.



Gambar 5.16 Grafik *trace cable*  $z_0 = 0,3$  m



Gambar 5.17 Grafik *trace cable*  $z_0 = 0,17$  m



Gambar 5.18 Grafik *trace cable*  $z_0 = 0,45$  m

### 5.2.7. Kehilangan Gaya Prategang (*Loss of Prestress*)

Pengaruh gaya prategang dibagi menjadi dua yaitu sebelum kehilangan gaya prategang dan sesudah kehilangan gaya prategang. Kehilangan gaya

prategang (*lossprestress*) dapat dikelompokkan menjadi dua jenis, yaitu kehilangan prategang jangka pendek dan kehilangan prategang jangka panjang.

Luas aktual area baja prategang :

$$A_{ps} = n_s \cdot A_{st} = 600 \cdot 126,6769 = 76006,1219 \text{ mm}^2$$

Kuat tarik *strand*,  $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$

Tegangan leleh *strand*,  $f_{py} = 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1860 = 1581 \text{ MPa}$

Gaya *prestress* saat *jacking*,

$$P_j = 83404,4931 \text{ MPa}$$

Tegangan baja *prestress* saat *jacking*,

$$f_{pi} = \frac{83404,4931 \cdot 10^3}{76006,1219} = 1097,3391 \text{ MPa}$$

#### 1. Kehilangan Prategang Jangka Pendek

##### a. Kehilangan tegangan akibat gesekan ankur (*Anchorage Friction*)

Kehilangan gaya prategang karena slip ankur pada komponen paskatarik diakibatkan adanya blok-blok pada ankur pada saat gaya pendongkrak disalurkan ke ankur. Panjang tarik masuk berkisar antara 2 – 7 mm.

Pergeseran ankur,  $\Delta A = 6 \text{ mm} = 0,0064 \text{ m}$

Modulus elastis baja prategang,  $E_s = 190000 \text{ MPa}$

Panjang tendon,  $L = 50 \text{ m}$

Kehilangan prategang akibat pergeseran ankur:

$$\begin{aligned} \Delta f_{pA} &= \frac{\Delta A}{L} \cdot E_s \\ &= \frac{0,0064}{50} \times 190000 = 24,32 \text{ MPa} \end{aligned}$$

##### b. Kehilangan tegangan akibat gesekan *cable* (*Jack Friction*)

1) Sudut lintasan tendon dari ujung ke tengah:

$$\alpha_{AB} = \alpha_{BC} = 0,0933 \text{ rad}$$

2) Perubahan sudut total lintasan tendon,

$$\alpha = \alpha_{AB} + \alpha_{BC} = 0,0933 + 0,0933 = 0,1865 \text{ rad}$$



Dari Tabel 5.50 dengan tipe tendon selubung logam fleksibel *stands* 7 kawat diperoleh :

Tabel 5.50 Koefisien *wobble* dan koefisien kelengkungan

Tipe tendon	Koefisien <i>Wobble</i> , $K$	Koefisien Kelengkungan $\mu$
Selubung logam fleksibel		
-tendon kawat	0,0010 – 0,0015	0,15 – 0,25
-batang kekuatan tinggi	0,0001 – 0,0006	0,08 – 0,30
- <i>strands</i> 7 kawat	0,0005 – 0,0020	0,15 – 0,25

(Sumber : Kadir, 2006)

- 3) Koefisien gesek,  $\mu = 0,2$
- 4) Koefisien *Wobble*,  $K = 0,001$
- 5) Kehilangan tegangan akibat gesekan:

Bilangan natural,  $e = 2,7183$

Untuk,  $Lx = 50$  m

$$\begin{aligned} \Delta f_{pF} &= fpj \cdot [1 - e^{-(\mu \cdot \alpha) + (\beta \cdot Lx)}] \\ &= 1097,3391 \cdot [1 - 2,7183^{-(0,2 \cdot 0,1865) + (0,001 \cdot 50)}] \\ &= 14,0142 \text{ MPa} \end{aligned}$$

- c. Kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis (*Elastic Shortening*)

- 1) Jarak titik berat tendon baja terhadap titik berat *box girder*,

$$e_s = 1,1546 \text{ m}$$

- 2) Momen inersia tampang *box girder*,  $I_x = 4,3844 \text{ m}^4$

- 3) Luas tampang *box girder*,  $A = 5,83 \text{ m}^2$

- 4) Berat jenis beton prategang,  $Wc = 25,5 \text{ kN/ m}^3$

- 5) Kuat tekan beton prategang,  $f'c = 49,8 \text{ MPa}$

- 6) Modulus elastis beton *box girder* saat transfer

- 7)  $f'ci = 80\% f'c = 80\% \cdot 49,8 = 39,84 \text{ MPa}$

8) Modulus elastis *box girder*, saat transfer

$$E_{ci} = 0,043 \cdot Wc^{1,5} \cdot \sqrt{f'_{ci}} = 0,043 \cdot 25,5^{1,5} \cdot (39,84)^{0,5} = 34949,292 \text{ MPa}$$

9) Modulus elastis baja prategang (*strand*),  $E_s = 190000 \text{ MPa}$

10) Jumlah total *strands*,  $n_s = 600 \text{ strands}$

11) Luas tampang tendon prategang,  $A_{ps} = 76006,1219 \text{ mm}^2$

12) Momen akibat berat sendiri *box girder*,  $M_{bs} = 46457,8125 \text{ kNm}$

13) Modulus ratio antara baja prategang dengan *box girder*,

$$n = \frac{E_s}{E_{ci}} = \frac{190000}{34949,292} = 0,0054$$

14) Tegangan baja setelah memperhitungkan *loss of prestress* akibat pengaruh pengangkuran dan gesekan kabel,

$$\begin{aligned} f_{pi} &= f_{pj} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pF} \\ &= 1097,3391 - 24,32 - 14,0142 = 1059,005 \text{ MPa} \end{aligned}$$

15) Gaya prategang setelah *loss of prestress* akibat friksi,

$$P_i = f_{pi} \cdot A_{ps} = 1059,005 \cdot 10^{-3} \cdot 76006,1219 = 80490,8618 \text{ kN}$$

16) Tegangan beton di pusat berat tendon saat transfer,

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_x} + \frac{M_{bs} \cdot e_s}{I_x} \\ &= -\frac{80490,8618 \cdot 10^3}{5,83 \cdot 10^6} - \frac{80490,8618 \cdot 10^3 \cdot (1,1546 \cdot 10^3)^2}{4,3844 \cdot 10^{12}} + \frac{46457,8125 \cdot 10^6 \cdot 1,1546 \cdot 10^3}{4,3844 \cdot 10^{12}} \\ &= -26,0462 \text{ MPa} \end{aligned}$$

17) Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis,

$$\begin{aligned} \Delta f_{pES} &= n \cdot f_{cs} \\ &= 0,0054 \cdot 26,0462 = 0,1416 \text{ MPa} \end{aligned}$$

18) Untuk balok paskatarik dengan 30 tendon yang ditarik 5 tendon setiap penarikan tendon,

$$\begin{aligned} \Delta f_{pES} &= \frac{(5/5) + (4/5) + (3/5) + (2/5) + (1/5)}{6} \cdot 0,1416 \\ &= 0,1416 \text{ MPa} \end{aligned}$$

19) Tegangan baja prategang setelah transfer,

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_{pi} - (\Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES}) \\ &= 1097,3391 - (24,32 + 14,0142 + 0,1416) \\ &= 1058,8634 \text{ MPa} \end{aligned}$$

20) Gaya prategang setelah transfer,

$$\begin{aligned} P_i &= A_{ps} \cdot f_{ps} \\ &= 76006,1219 \cdot 1058,8634 \cdot 10^{-3} = 80480,0994 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 2. Kehilangan Prategang Jangka Panjang

a. Kehilangan tegangan akibat pengaruh rangkai (*Creep*)

1) Untuk prategang paskatarik ditentukan,

2)  $K_{cr} = 1,6$  – untuk komponen paskatarik

3)  $E_s = 190000 \text{ MPa}$

4)  $E_c = 39074,4971 \text{ MPa}$

5) Rasio modulus,  $n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{190000}{39074,4971} = 4,8625$

6) Tegangan tendon dipusat berat beton,

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_x} + \frac{M_{bs} \cdot e_s}{I_x} \\ &= -\frac{80480,0994 \cdot 10^3}{5,83 \cdot 10^6} - \frac{80480,0994 \cdot 10^3 \cdot (1,1546 \cdot 10^3)^2}{4,3844 \cdot 10^{12}} + \frac{55123,8281 \cdot 10^6 \cdot 1,1546 \cdot 10^3}{4,3844 \cdot 10^{12}} \\ &= -26,0411 \text{ MPa} \end{aligned}$$

7) Momen akibat beban tambahan,  $M_D = 10743,7563 \text{ kNm}$

8) Tegangan beton di pusat berat tendon saat transfer,

$$\begin{aligned} f_{csd} &= \frac{M_{SD} \cdot e_s}{I_x} \\ &= \frac{10743,7563 \cdot 10^6 \cdot 1,1546 \cdot 10^3}{4,3844 \cdot 10^{12}} \\ &= 2,8293 \text{ MPa} \end{aligned}$$

9) Kehilangan prategang akibat pengaruh rangkai,

$$\begin{aligned}\Delta f_{pCR} &= n \cdot K_{cr} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \\ &= 4,8625 \cdot 1,6 \cdot (26,0411 - 2,8293) \\ &= 180,5878 \text{ MPa}\end{aligned}$$

10) Peningkatan tegangan tarik akibat beban mati tambahan saat *toping*,

$$\begin{aligned}\Delta f_{pSD} &= n \cdot f_{csd} \\ &= 4,8625 \cdot 2,8293 \\ &= 13,7576 \text{ MPa}\end{aligned}$$

b. Kehilangan tegangan akibat pengaruh susut (*Shrinkage*)

Kehilangan prategang akibat susut dengan menggunakan metode perawatan basah selama 7 hari.

1)  $t = 30$  hari

2)  $E_{ps} = 190000$  MPa

3) Regangan susut *ultimate*  $E_{SHu} = 800 \cdot 10^{-6}$

$$\begin{aligned}E_{SH,t} &= \frac{t}{(t+35)} \cdot E_{SHu} \\ &= \frac{30}{(30+35)} \cdot 800 \cdot 10^{-6} = 3,69 \times 10^{-4}\end{aligned}$$

4) Kehilangan prategang akibat pengaruh susut,

$$\begin{aligned}\Delta f_{pSH} &= E_{SH,t} \cdot E_{ps} \\ &= 3,69 \cdot 10^{-4} \cdot 190000 = 70,1538 \text{ MPa}\end{aligned}$$

c. Kehilangan tegangan akibat relaksasi tendon (*Relaxation of Tendon*)

Relaksasi tendon mengalami tegangan tarik dalam waktu yang cukup lama.

1) Kuat tarik tendon,  $f_{pu} = 1860$  MPa

2) Kuat leleh tendon,  $f_{py} = 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1860 = 1581$  MPa

3) Tegangan baja prategang setelah *transfer*,  $f_{ps} = 1058,8634$  MPa

4) Diperhitungkan tegangan tendon 3 bulan setelah *transfer*

$$t_1 = 1 \text{ hari}$$

$$t_2 = 1 \text{ bulan} = 30 \text{ hari} = 720 \text{ jam}$$

5) Kehilangan prategang akibat *relaxation of tendon*:

$$\begin{aligned} \Delta f_{pR} &= f_{pi} \cdot \left( \frac{\log t_2 - \log t_1}{45} \right) \cdot \left( \frac{f_{ps}}{f_{py}} - 0,55 \right) \\ \Delta f_{pR} &= 1058,8634 \cdot \left( \frac{\log 720 - \log 1}{45} \right) \cdot \left( \frac{1058,8634}{1581} - 0,55 \right) \\ &= 8,0508 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Total kehilangan gaya prategang pada variasi tinggi yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.51 – Tabel 5.54

Tabel 5.51 Total kehilangan gaya prategang *box girder prestressed*  $h = 2,6$  m

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persentase (%)
	Setelah Penegangan	1097,339	100%
<b>Kehilangan tegangan</b>			
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	24,320	2,216%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	14,014	1,277%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	0,142	0,013%
4	Rangak beton ( <i>creep</i> )	180,588	16,457%
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	70,154	6,393%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	8,051	0,734%
<b>Beban mati tambahan</b>			
1	Beban mati tambahan topping	13,758	1,254%
Tegangan Akhir ( $f_{pe}$ )		813,829	74,164%
Kehilangan Tegangan Total ( <i>loss of prestress</i> )			25,836%

Tabel 5.52 Total kehilangan gaya prategang *box girder prestressed*  $h = 2,4$  m

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persentase (%)
	Setelah Penegangan		
<b>Kehilangan tegangan</b>			
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	24,320	2,202%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	17,992	1,629%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	0,053	0,005%
4	Rangkak beton ( <i>creep</i> )	178,203	16,134%
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	70,154	6,351%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	8,217	0,744%
<b>Beban mati tambahan</b>			
1	Beban mati tambahan topping	14,639	1,325%
Tegangan Akhir ( $f_{pe}$ )		813,829	820,239
Kehilangan Tegangan Total ( <i>loss of prestress</i> )			25,739%

Tabel 5.53 Total kehilangan gaya prategang *box girder prestressed*  $h = 2,2$  m

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persentase (%)
	Setelah Penegangan		
<b>Kehilangan tegangan</b>			
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	24,320	2,178%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	22,151	1,984%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	0,053	0,005%
4	Rangkak beton ( <i>creep</i> )	175,760	15,743%
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	70,154	6,284%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	8,609	0,771%
<b>Beban mati tambahan</b>			
1	Beban mati tambahan topping	15,675	1,404%
Tegangan Akhir ( $f_{pe}$ )		813,829	831,053
Kehilangan Tegangan Total ( <i>loss of prestress</i> )			25,561%

Tabel 5.54 Total kehilangan gaya prategang *box girder prestressed*  $h = 2$  m

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persentase (%)
	Setelah Penegangan		
<b>Kehilangan tegangan</b>			
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	24,320	2,142%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	26,596	2,343%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	0,140	0,012%
4	Rangkak beton ( <i>creep</i> )	173,350	15,271%

Lanjutan Tabel 5.54 Total kehilangan gaya prategang *box girder prestressed*

$$h = 2 \text{ m}$$

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (Mpa)	Persentase (%)
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	70,154	6,180%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	9,340	0,823%
<b>Beban mati tambahan</b>			
1	Beban mati tambahan topping	16,905	1,489%
Tegangan Akhir ( $f_{pe}$ )		813,829	848,129
Kehilangan Tegangan Total ( <i>loss of prestress</i> )			25,283%

6) Jadi total kehilangan tegangan akhir/tegangan efektif,

$$f_{eff} = 871,1757 \text{ MPa}$$

7) Gaya efektif di tengah bentang balok:

$$\begin{aligned} P_{eff} &= A_{ps} \cdot f_{eff} \\ &= 76006,1219 \cdot 871,1757 \cdot 10^{-3} \\ &= 61855,9535 \text{ kN} \end{aligned}$$

### 5.2.8. Tegangan Yang Terjadi Akibat Gaya Prategang

Tegangan beton pada kondisi saat transfer dan kondisi layan (setelah memperhitungkan semua kehilangan tegangan) tidak boleh melebihi nilai tegangan ijin beton sebagai berikut:

Saat transfer

$$\text{serat tekan} : f_{ci} = 0,60 \cdot f'_c = 0,60 \cdot 39,84 = 23,904 \text{ MPa}$$

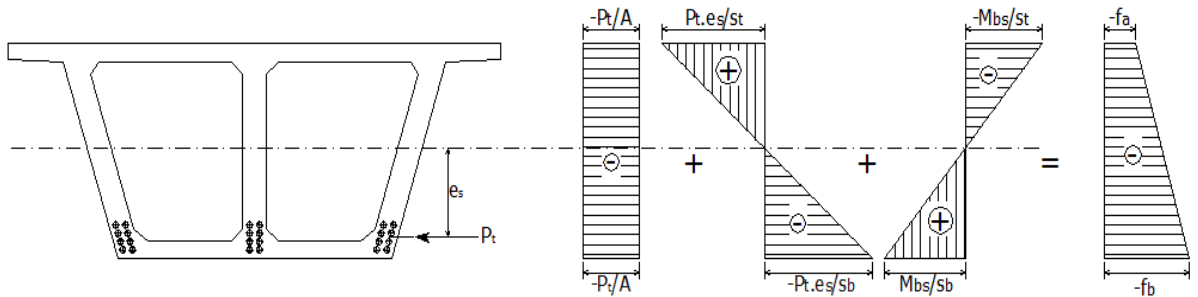
$$\text{serat tarik} : f_{ti} = 0,25 \cdot \sqrt{f'_c} = 0,25 \cdot \sqrt{39,84} = 1,5780 \text{ MPa}$$

Saat layan,

$$\text{serat tekan} : f_{cs} = 0,45 \cdot f'_c = 0,45 \cdot 49,8 = 22,41 \text{ MPa}$$

$$\text{serat tarik} : f_{ts} = 0,50 \cdot \sqrt{f'_c} = 0,50 \cdot \sqrt{49,8} = 3,5285 \text{ MPa}$$

## 1. Keadaan Awal (Transfer)



Gambar 5.19 Tegangan saat transfer

(Sumber: SNI-12-2004 )

Balok direncanakan dengan beton pategang paskatarik dengan tendon terikat, maka pada saat transfer digunakan penampang *netto* (lihat Gambar 5.19).

- Diameter selubung,  $D = 76,2 \text{ mm} = 0,0762 \text{ m}$
- Jumlah tendon,  $n_t = 30$  buah
- Luas penampang *bruto*,  $A_{bruto} = 5,83 \text{ m}^2$
- Luas selubung tendon,

$$A_{selubung} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot n_t = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,0762^2 \cdot 30 = 0,1368 \text{ m}^2$$

- Luas penampang *netto*,  $A_{netto} = A_{bruto} - A_{selubung}$   
 $= 5,83 - 0,1368 = 5,6932 \text{ m}^2$

- Letak garis netral dicari dengan statis momen sisi bawah:

$$c_b = \frac{(\sum A_i \cdot y_i) - (A_{selubung} \cdot y_{selubung})}{A_{netto}}$$

- Momen inersia terhadap titik berat balok :

$$I_x = 4,3844 \text{ m}^4$$

- Untuk selubung tendon :

Jarak terhadap sisi bawah,  $y = z_0 = 0,3 \text{ m}$

$$\text{Statis momen} = A_{selubung} \cdot y = 0,1368 \cdot 0,3 = 0,041 \text{ m}^3$$



- i. Maka letak garis netral :

$$c_b = \frac{8,48 - 0,041}{5,6932} = 1,4824 \text{ m}$$

$$c_t = h - c_b = 2,6 - 1,4824 = 1,1176 \text{ m}$$

- j. Eksentrisitas tendon di tengah bentang :

$$e = c_b - z_o = 1,4824 - 0,3 = 1,1824 \text{ m}$$

- k. Momen Inersia Penampang *netto* :

Jarak terhadap titik berat,  $y = e = 1,1824 \text{ m}$

Momen Inersia selubung tendon

$$\begin{aligned} &= n_t \cdot \left( \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot D^4 + \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot y^2 \right) \\ &= 30 \cdot \left( \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot 0,0762^4 + \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,0762^2 \cdot 1,1824^2 \right) \\ &= 0,1913 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- l. Jadi momen inersia penampang *netto* :

$$\begin{aligned} I_x &= I_i - (I_{selubung} + A_{selubung} \cdot y_{selubung}^2) \\ &= 4,3844 - 0,1913 = 4,1931 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

- m. Modulus penampang bagian atas :

$$s_t = \frac{I_x}{c_t} = \frac{4,1931}{1,1176} = 3,7517 \text{ m}^3$$

- n. Modulus penampang bagian bawah :

$$s_b = \frac{I_x}{c_b} = \frac{4,1931}{1,4824} = 2,8287 \text{ m}^3$$

- o. Tegangan-tegangan yang terjadi saat transfer (lihat Gambar 5.18),

Tegangan pada serat atas :

$$\begin{aligned} f_t &= -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \cdot e_s}{s_t} - \frac{M_{MS}}{s_t} \\ &= -\frac{70893,8192 \cdot 10^3}{5,83 \cdot 10^6} + \frac{70893,8192 \cdot 10^3 \cdot 1,1824 \cdot 10^3}{3,7517 \cdot 10^9} - \frac{52546,8813 \cdot 10^6}{3,7517 \cdot 10^9} \\ &= -3,824 \text{ MPa} < f_{ci} = 1,5780 \text{ MPa} \dots \dots (\text{OK}) \end{aligned}$$

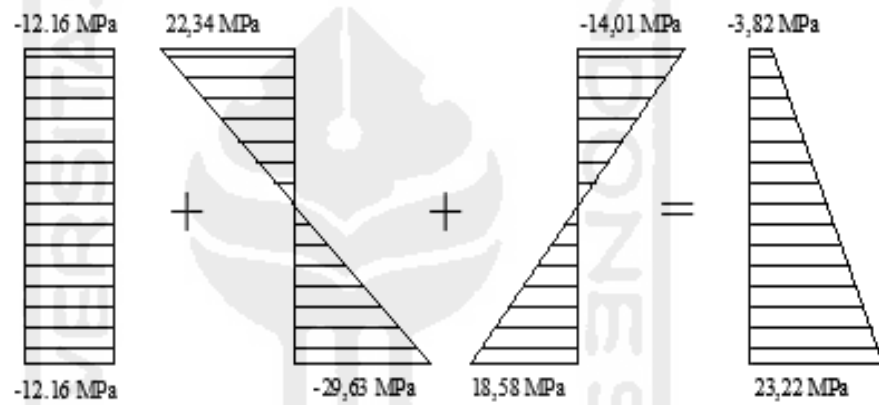
p. Tegangan pada serat bawah:

$$f_b = -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s}{s_b} + \frac{M_{MS}}{s_b}$$

$$= -\frac{70893,8192 \cdot 10^3}{5,83 \cdot 10^6} - \frac{70893,8192 \cdot 10^3 \cdot 1,1824 \cdot 10^3}{2,8287 \cdot 10^9} + \frac{52546,8813 \cdot 10^6}{2,8287 \cdot 10^9}$$

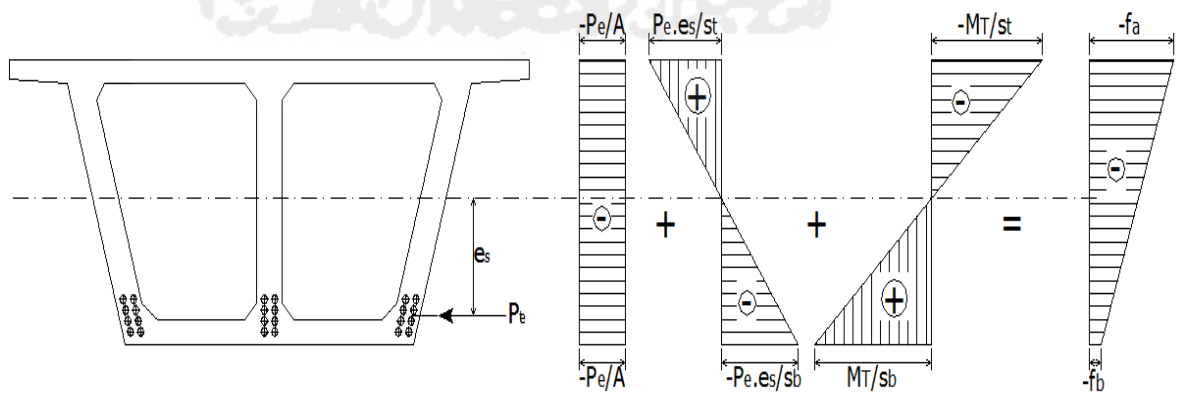
$$= -23,2168 \text{ MPa} < f_{ci} = 23,904 \text{ MPa} \dots \dots \text{(OK)}$$

Berikut gambaran tegangan dan regangan yang terjadi pada saat transfer gaya seperti pada Gambar 5.20



Gambar 5.20 Diagram tegangan *box girder* saat transfer

b. Keadaan Akhir (*Service*)



Gambar 5.21 Tegangan saat *service*

( Sumber : SNI-12-2004 )

Karena prategang paskatarik dengan tendon terekat, maka digunakan penampang transformasi (lihat Gambar 5.21).

- 1) Luas penampang *bruto*,  $A_{bruto} = 5,83 \text{ m}^2$
- 2) Modulus elastis baja,  $E_s = 190000 \text{ MPa}$
- 3) Modulus elastis beton,  $E_c = 39074,4971 \text{ MPa}$
- 4) Angka ekuivalensi ( $n$ ) =  $\frac{190000}{39074,4971} = 4,8625$
- 5) Luas tampang tendon prategang,  $A_{ps} = 0,0760 \text{ m}^2$
- 6) Luas penampang transformasi,  $A_t = A + (n-1) \cdot A_{ps}$   
 $= 5,83 + (4,8625-1) \cdot 0,0760 = 6,1236 \text{ m}^2$
- 7) Letak garis netral dicari dengan statis momen sisi bawah :  

$$c_b = \frac{(\sum A_i \cdot y_i) - ((n-1) \cdot (A_{ps} \cdot y))}{A_{transformasi}}$$
- 8) Momen inersia terhadap titik berat balok :  
 $I_x = 4,3844 \text{ m}^4$
- 9) Untuk selubung tendon :  
 Jarak terhadap sisi bawah,  $y = 0,3 \text{ m}$   
 Statis momen =  $(n-1) \cdot (A_{ps} \cdot y) = (4,8625-1) \cdot (0,0760 \cdot 0,3) = 0,0881 \text{ m}^3$
- 10) Maka letak garis netral :  

$$c_b = \frac{8,48 - 0,0881}{6,1236} = 1,3705 \text{ m}$$
  

$$c_t = h - c_b = 2,6 - 1,3705 = 1,2295 \text{ m}$$
- 11) Eksentrisitas tendon di tengah bentang :  
 $e = c_b - z_o = 1,3705 - 0,3 = 0,9295 \text{ m}$
- 12) Momen Inersia Penampang Transformasi untuk selubung tendon,  
 Jarak terhadap titik berat,  $y = e = 0,9295 \text{ m}$

$$\begin{aligned}
 13) \text{ Momen Inersia selubung tendon} &= (n-1)(A_{ps} \cdot y^2) \\
 &= (4,8625 - 1)(0,0760 \cdot 0,9295^2) \\
 &= 0,2536 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

14) Jadi momen inersia penampang transformasi :

$$\begin{aligned}
 I_x &= I_i + [(n-1)(A_{ps} \cdot y^2)] \\
 &= 4,3844 + 0,2536 = 4,6380 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

15) Modulus penampang bagian atas :

$$s_t = \frac{I_x}{c_t} = \frac{4,6380}{1,2295} = 3,7723 \text{ m}^3$$

16) Modulus penampang bagian bawah :

$$s_b = \frac{I_x}{c_b} = \frac{4,6380}{1,3705} = 3,3842 \text{ m}^3$$

17) Gaya prategang efektif,

$$P_{eff} = 61855,9535 \text{ kN}$$

18) Momen-momen yang bekerja saat layan,

$$\begin{aligned}
 M_T &= M_{MS} + M_A + M_{TD} + M_{TB} + M_{EW} + M_{EQ} \\
 &= 78222,3591 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

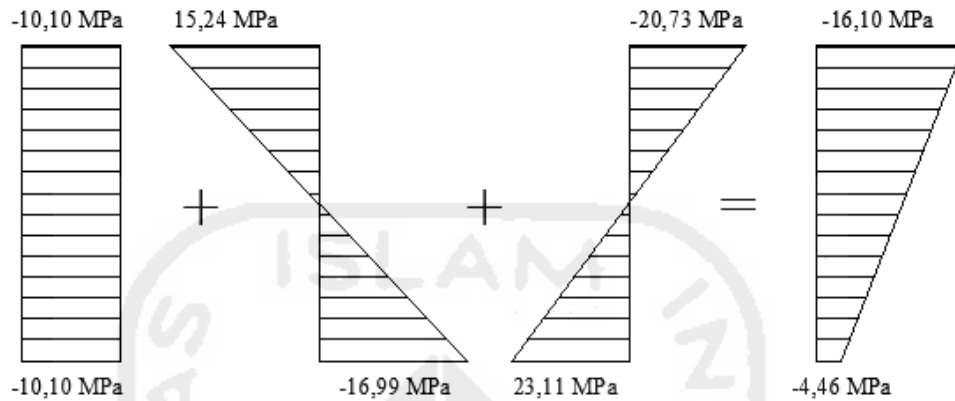
a) Tegangan pada serat atas:

$$\begin{aligned}
 f_t &= -\frac{P_e}{At} + \frac{P_e \cdot e_s}{s_t} - \frac{M_T}{s_t} \\
 &= -\frac{61855,9535 \cdot 10^3}{6,1236 \cdot 10^6} + \frac{61855,9535 \cdot 10^3 \cdot 0,9295 \cdot 10^3}{3,7723 \cdot 10^9} - \frac{78222,3591 \cdot 10^6}{3,7723 \cdot 10^9} \\
 &= -16,1045 \text{ MPa} < f_{cs} = 22,41 \text{ MPa} \dots\dots\dots \text{OK}
 \end{aligned}$$

b) Tegangan pada serat bawah:

$$\begin{aligned}
 f_b &= -\frac{P_e}{At} - \frac{P_e \cdot e_s}{s_b} + \frac{M_T}{s_b} \\
 &= -\frac{61855,9535 \cdot 10^3}{6,1236 \cdot 10^6} - \frac{61855,9535 \cdot 10^3 \cdot 0,9295 \cdot 10^3}{3,3842 \cdot 10^9} + \frac{78222,3591 \cdot 10^6}{3,3842 \cdot 10^9} \\
 &= -4,4853 \text{ MPa} < f_{cs} = 3,5284 \text{ MPa} \dots\dots\dots \text{OK}
 \end{aligned}$$

Berikut gambaran tegangan dan regangan yang terjadi pada saat *service* seperti pada Gambar 5.22.

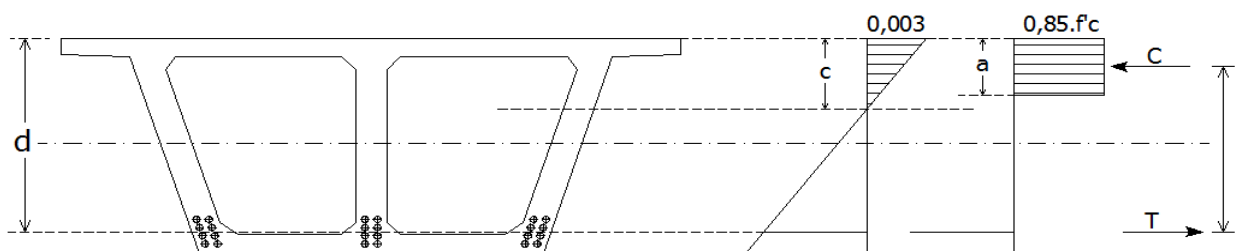


Gambar 5.22 Diagram tegangan *box girder* saat *service*

### 5.2.9. Tinjauan *Ultimate Box girder* Prategang

#### 1. Kapasitas Momen *Ultimate*

- a. Modulus elastis baja prategang (*strands*) ASTM A-416,  
 $E_s = 190000 \text{ MPa}$
- b. Jumlah total *strands*,  $n_s = 600 \text{ strands}$
- c. Luas tampang nominal satu *strand*,  $A_{st} = 126,6768 \text{ mm}^2$
- d. Tegangan leleh tendon baja prategang,  $f_{py} = 1581 \text{ MPa}$
- e. Luas tampang tendon baja prategang,  
 $A_{ps} = n_s \cdot A_{st} = 600 \cdot 126,677 = 76006,1219 \text{ mm}^2 = 0,0760 \text{ m}^2$
- f. Kuat tekan beton,  $f'_c = 49,8 \text{ MPa}$



Gambar 5.23 Kapasitas penampang *box girder*  
( Sumber : SNI-12-2004 )

$$B_1 = 5,5 \text{ m} \quad t_1 = 0,3 \text{ m} \quad c_t = 1,1454 \text{ m}$$

$$B_2 = 0,75 \text{ m} \quad t_2 = 0,2 \text{ m} \quad e_s = 1,1546 \text{ m}$$

- g. Tegangan batas prategang ( $f_{pu}$ ) pada keadaan *ultimate*, ditetapkan sebagai berikut :

$$f_{ps} = f_{pu} \left[ 1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'c} \right]$$

- h. Gaya prategang efektif (setelah *loss of prestress*),  $P_{eff} = 61855,9535$  kN

- i. Tegangan efektif baja prategang,

$$f_{eff} = \frac{P_{eff}}{A_{ps}} = \frac{61855,9535 \cdot 10^3}{76006,1219} = 813,8286 \text{ MPa}$$

- j. Lebar flens box girder,

$$b = B_1 + (2 \cdot B_2) = 5,5 + (2 \cdot 0,75) = 7 \text{ m}$$

- k. Tinggi efektif box girder,

$$d = C_t + e_s = 1,1454 + 1,1546 = 2,3 \text{ m}$$

- l. Rasio luas penampang baja prategang,

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{b \cdot d} = \frac{76006,1219 \cdot 10^{-6}}{7 \cdot 2,3} = 0,0047$$

- m. Untuk baja *Low Relaxation*,  $\gamma_p = 0,4$

- n. Untuk  $f'c = 49,8 \text{ MPa} > 30 \text{ MPa}$  maka nilai:

$$\beta_1 = 0,85 - 0,08 \cdot \left( \frac{f'c - 30}{10} \right)$$

$$= 0,85 - 0,08 \cdot \left( \frac{49,8 - 30}{10} \right)$$

$$= 0,6916$$

$$f_{ps} = f_{pu} \left[ 1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'c} \right]$$

$$= 1860 \cdot \left( 1 - \frac{0,4 \cdot 0,0047 \cdot 1860}{0,6916 \cdot 49,8} \right)$$

$$= 1670,3188 \text{ MPa} > f_{py} \cdot 0,85 \cdot f_{pu} = 1581 \text{ Mpa}$$

$$\text{Maka dipakai } f_{ps} = f_{py} = 1581 \text{ MPa}$$

- o. Cek daktilitas penampang,

$$\omega_p = \frac{\rho_p \cdot f_{ps}}{f'c}$$

$$= \frac{0,0047 \cdot 1581}{49,8}$$

$$= 0,1499 < 0,36 \cdot \beta_1 = 0,36 \cdot 0,6916 = 0,249 \text{ daktilail} \quad \text{OK}$$

- p. Gaya internal tendon baja prategang,

$$T_{ps} = A_{ps} \cdot f_{ps}$$

$$= 76006,1219 \cdot 1581 \cdot 10^{-3} = 120165,679 \text{ kN}$$

- q. Tinggi blok tekan,

$$a = \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{(0,85 \cdot f'c \cdot b)} = \frac{76006,1219 \cdot 10^{-6} \cdot 1581}{(0,85 \cdot 49,8 \cdot 7)} = 0,4055 \text{ m}$$

- r. Momen nominal,

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right)$$

$$= 76006,1219 \cdot 10^{-3} \cdot 1581 \cdot \left( 2,3 - \frac{0,4055}{2} \right)$$

$$= 252015,042 \text{ kNm}$$

- s. Faktor reduksi kekuatan lentur,  $\phi = 0,8$

- t. Kapasitas momen *ultimate box girder* prategang,

$$M_{uk} = \phi \cdot M_n$$

$$= 0,8 \cdot 252015,042$$

$$= 201612,033 \text{ kNm}$$

## 2. Momen *Ultimate* Akibat Beban

Momen *ultimate* dihitung dengan mengalikan momen yang bekerja dengan faktor beban *ultimate*.

Untuk hasil perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.55 berikut.

Tabel 5.55 Perhitungan momen *ultimate* akibat beban yang bekerja

No	Aksi Beban	Faktor Beban	Momen (kNm)	Momen <i>Ultimate</i>	
1	Berat sendiri	$K_{MS}$	1,2	52546,881	63056,258
2	Beban mati tambahan	$K_{MA}$	2	4654,688	9309,375
3	Beban lajur "D"	$K_{TD}$	1,8	13232,500	23818,500
4	Beban pedestrian	$K_{TP}$	1,8	1054,688	1898,438
5	Gaya rem	$K_{TB}$	1,8	365,446	657,803
6	Beban angin	$K_{EW}$	1,2	648,000	777,600
7	Beban gempa	$K_{EQ}$	1	5720,157	5720,157
Total momen <i>ultimate</i> yg bekerja					105238,13

- 1) Kontrol momen kapasitas,

$$M_{uk} > M_n$$

$$201612,033 \text{ kNm} > 105238,13 \text{ kNm} \dots\dots\dots \text{OK}$$

### 5.2.10. Lendutan Pada *Box girder* Prategang

1. Lendutan Pada Keadaan Awal (Transfer)

- a. Jarak titik berat tendon baja terhadap titik berat *box girder* prategang,

$$e_s = 1,1546 \text{ m}$$

- b. Momen inersia tampang *box girder*,  $I_x = 4,3844 \text{ m}^4$

- c. Gaya prategang awal,  $P_o = 70893,8192 \text{ kN}$

- d. Lendutan ke atas/lawan lendut (*chamber*)

$$\begin{aligned} \delta_c &= -\frac{5}{48} \cdot \frac{P_o \cdot e_s \cdot L^2}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= -\frac{5}{48} \cdot \frac{70893,8192 \cdot 1,1546 \cdot 50^2}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = -0,1244 \text{ m, } (\uparrow) \text{ ke atas} \end{aligned}$$

- e. Lendutan ke bawah (*deflection*)

$$\begin{aligned} \delta_D &= \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{bs} \cdot L^4}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{5}{48} \cdot \frac{148,6650 \cdot 50^4}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = +0,0706 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah} \end{aligned}$$



f. Total lendutan saat transfer,

$$\begin{aligned}\delta_T &= \delta_c + \delta_D \\ &= -0,1244 + 0,0706 = -0,0538 \text{ m, } (\uparrow) \text{ ke atas}\end{aligned}$$

2. Lendutan Pada Keadaan Akhir (*Service*)

a. Lendutan ke atas (*chamber*)

$$\begin{aligned}\delta_c &= \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^2}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{5}{48} \cdot \frac{61855,9535 \cdot 1,1546 \cdot 50^2}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = -0,1086 \text{ m, } (\uparrow) \text{ ke atas}\end{aligned}$$

b. Lendutan yang terjadi akibat beban yang bekerja

1) Lendutan Akibat Berat Sendiri (*MS*)

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{MS} \cdot L^4}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{5}{384} \cdot \frac{168,15 \cdot 50^4}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = 0,0799 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah}\end{aligned}$$

2) Lendutan Akibat Beban Mati Tambahan (*MA*)

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{MA} \cdot L^4}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{5}{384} \cdot \frac{14,895 \cdot 50^4}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = 0,0071 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah}\end{aligned}$$

3) Lendutan Akibat Beban Lajur "D" (*TD*)

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{1}{48} \cdot \frac{P_{TD} \cdot L^3}{(Ec \cdot I_x)} + \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{TD} \cdot L^4}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{1}{48} \cdot \frac{68,6 \cdot 50^3}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} + \frac{5}{384} \cdot \frac{39,6 \cdot 50^4}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} \\ &= 0,0199 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah}\end{aligned}$$

4) Lendutan Akibat Beban Pejalan Kaki (*TP*)

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{TP} \cdot L^4}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{5}{384} \cdot \frac{3,375 \cdot 50^4}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = 0,0016 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah}\end{aligned}$$

5) Lendutan Akibat Beban Rem (*TB*)

$$\begin{aligned}\delta &= 0,0642 \cdot \frac{M_{TB} \cdot L^2}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= 0,0642 \cdot \frac{365,446 \cdot 50^2}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = 0,0000694 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah}\end{aligned}$$

6) Lendutan Akibat Beban Angin (*EW*)

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{EW} \cdot L^4}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{5}{384} \cdot \frac{2,0736 \cdot 50^4}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = 0,0010 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah}\end{aligned}$$

7) Lendutan Akibat Beban Gempa (*EQ*)

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \cdot \frac{Q_{EQ} \cdot L^4}{(Ec \cdot I_x)} \\ &= \frac{5}{384} \cdot \frac{18,3045 \cdot 50^4}{(39074,4971 \cdot 10^3 \cdot 4,3844)} = 0,0087 \text{ m, } (\downarrow) \text{ ke bawah}\end{aligned}$$

Untuk dapat mengetahui total lendutan yang terjadi pada *box girder* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.56 – Tabel 5.59 berikut ini.

Tabel 5.56 Rangkuman perhitungan lendutan  $h = 2,6$  m dan  $f'c = 58,1$  MPa

No	Jenis Beban	Kode Beban	Lendutan (m)	Keterangan
A	Lendutan ke atas	<i>PR</i>	-0,1086	<i>CHAMBER</i>
B	Lendutan ke bawah			
1	Berat sendiri	<i>MS</i>	0,0799	<i>DEFLECTION</i>
2	Mati tambahan	<i>MA</i>	0,0071	<i>DEFLECTION</i>
3	Lajur "D"	<i>TD</i>	0,0199	<i>DEFLECTION</i>
4	Pejalan kaki	<i>TP</i>	0,0016	<i>DEFLECTION</i>
5	Gaya rem	<i>TB</i>	0,0001	<i>DEFLECTION</i>
6	Angin	<i>EW</i>	0,0010	<i>DEFLECTION</i>
7	Gempa	<i>EQ</i>	0,0087	<i>DEFLECTION</i>
Total Lendutan			0,0096	

Tabel 5.57 Rangkuman perhitungan lendutan  $h = 2,4$  m dan  $f'c = 58,1$  MPa

No	Jenis Beban	Kode Beban	Lendutan (m)	Keterangan
A	Lendutan ke atas	<i>PR</i>	-0,1192	<i>CHAMBER</i>
B	Lendutan ke bawah			
1	Berat sendiri	<i>MS</i>	0,0920	<i>DEFLECTION</i>
2	Mati tambahan	<i>MA</i>	0,0085	<i>DEFLECTION</i>
3	Lajur "D"	<i>TD</i>	0,0238	<i>DEFLECTION</i>
4	Pejalan kaki	<i>TP</i>	0,0019	<i>DEFLECTION</i>
5	Gaya rem	<i>TB</i>	0,0001	<i>DEFLECTION</i>
6	Angin	<i>EW</i>	0,0012	<i>DEFLECTION</i>
7	Gempa	<i>EQ</i>	0,0100	<i>DEFLECTION</i>
Total Lendutan			0,0184	

Tabel 5.58 Rangkuman perhitungan lendutan  $h = 2,2$  m dan  $f'c = 58,1$  MPa

No	Jenis Beban	Kode Beban	Lendutan (m)	Keterangan
A	Lendutan ke atas	<i>PR</i>	-0,1324	<i>CHAMBER</i>
B	Lendutan ke bawah			
1	Berat sendiri	<i>MS</i>	0,1076	<i>DEFLECTION</i>
2	Mati tambahan	<i>MA</i>	0,0104	<i>DEFLECTION</i>
3	Lajur "D"	<i>TD</i>	0,0291	<i>DEFLECTION</i>
4	Pejalan kaki	<i>TP</i>	0,0024	<i>DEFLECTION</i>
5	Gaya rem	<i>TB</i>	0,0001	<i>DEFLECTION</i>
6	Angin	<i>EW</i>	0,0014	<i>DEFLECTION</i>
7	Gempa	<i>EQ</i>	0,0118	<i>DEFLECTION</i>
Total Lendutan			0,0304	

Tabel 5.59 Rangkuman perhitungan lendutan  $h = 2$  m dan  $f'c = 58,1$  MPa

No	Jenis Beban	Kode Beban	Lendutan (m)	Keterangan
A	Lendutan ke atas	<i>PR</i>	-0,1493	<i>CHAMBER</i>
B	Lendutan ke bawah			
1	Berat sendiri	<i>MS</i>	0,1285	<i>DEFLECTION</i>
2	Mati tambahan	<i>MA</i>	0,0130	<i>DEFLECTION</i>
3	Lajur "D"	<i>TD</i>	0,0364	<i>DEFLECTION</i>
4	Pejalan kaki	<i>TP</i>	0,0029	<i>DEFLECTION</i>
5	Gaya rem	<i>TB</i>	0,0001	<i>DEFLECTION</i>
6	Angin	<i>EW</i>	0,0018	<i>DEFLECTION</i>
7	Gempa	<i>EQ</i>	0,0141	<i>DEFLECTION</i>
Total Lendutan			0,0476	

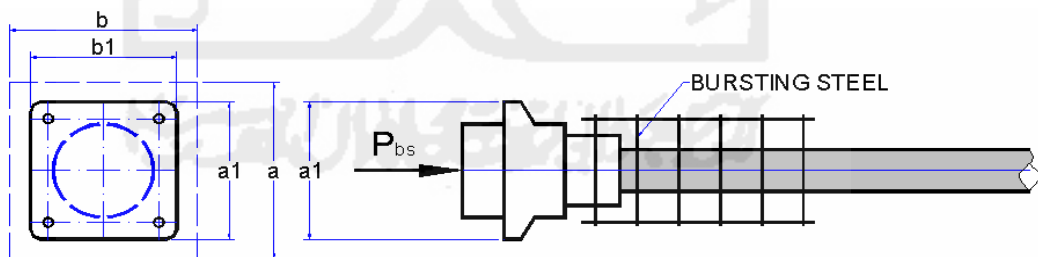
8) Jadi total lendutan adalah  $\delta_r = 0,0096$  m (↓) ke bawah

9) Lendutan maksimum yang diijinkan,

$$\delta = \frac{L}{240} = \frac{50}{240} = 0,2083 \text{ m} > \delta_r = 0,0096 \text{ m} \dots \text{OK}$$

### 5.2.11. Perhitungan *End Block*

Berikut contoh angkur pada struktur beton prategang yang digunakan pada sistem penarikan seperti pada Gambar 5.24.



Gambar 5.24 Pembesian angkur

(Sumber : Nugroho,2013 )

1. Angkur yang digunakan yaitu angkur tegangan *VSL tipe E-55* (Gambar 5.22).
2. Jumlah *strand* dalam 1 tendon = 20
3. Beban putus 1 *strand*,  $P_{bs}$  1 *strand* = 183,7 kN

4. Beban putus 1 tendon,  $P_{bs} 1 \text{ tendon} = 183,7 \cdot 20 \cdot 75,671\% = 2780,1498 \text{ kN}$
5. Lebar angkur,  $a = 300 \text{ mm}$
6.  $h$  balok = 2,6 m
7. Gaya tarik angkur,

$$\begin{aligned} T &= 0,25 \cdot P_{bs} \left(1 - \frac{a}{h}\right) \\ &= 0,25 \cdot 2780,1498 \cdot \left(1 - \frac{300}{2600}\right) \\ &= 614,8408 \text{ kN} = 614841 \text{ N} \end{aligned}$$

8.  $f_y$  baja untuk angkur yang digunakan = 390 MPa
9. Tegangan ijin baja untuk angkur =  $0,6 \cdot 390 = 234 \text{ MPa}$
10. Luas tulangan yang dibutuhkan,

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{T}{0,6 \cdot f_y} \\ &= \frac{614841}{0,6 \cdot 390} = 2627,5248 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

11. Diameter tulangan yang digunakan,  $D = 19 \text{ mm}$
12. Luas tulangan,  $A_{1D} = A_s = 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 19^2 \cdot 2 = 567,0575 \text{ mm}^2$
13. Tulangan angkur yang digunakan,  $= \frac{A_s}{A_{1D}} = \frac{2627,5248}{567,0575} = 4,6336 \text{ buah}$   
= 5 buah
14. Maka digunakan tulangan pada angkur **5D19**

### 5.2.12. Perhitungan Pembesian Non-Prategang

Untuk ketentuan perhitungan tulangan non-prategang minimum pada balok prategangan pada luas tulangan non-prategang minimum harus dihitung dari 0,4% A RSNI-T-12-2004 Pasal 6.8.9.8

Tulangan arah memanjang digunakan besi diameter,  $D = 19 \text{ mm}$

$$\text{Luas tulangan, } A_{1D} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 19^2 = 283,529 \text{ mm}^2$$

## 1. Bagian Tepi

- Tebal *web* tepi,  $t_4 = 0,40 \text{ m} = 400 \text{ mm}$
- Rasio tulangan susut,  $\rho = 0,4\%$
- Luas tulangan susut,  $A_s = \rho \cdot t_4 \cdot 1000 = 0,4 \cdot 400 \cdot 1000 = 1600 \text{ mm}^2$
- Jarak tulangan yang diperlukan :

$$s = \frac{A_{1D} \cdot 1000}{A_s} = \frac{283,529 \cdot 1000}{1600} = 177,205 \text{ mm}$$

- Dipakai **D19-150**

## 2. Bagian Tengah

- Tebal *web* tengah,  $t_3 = 0,40 \text{ m} = 400 \text{ mm}$
- Rasio tulangan susut,  $\rho = 0,4\%$
- Luas tulangan susut,  $A_s = \rho \cdot t_3 \cdot 1000 = 0,4 \cdot 400 \cdot 1000 = 1600 \text{ mm}^2$
- Jarak tulangan yang diperlukan :

$$s = \frac{A_{1D} \cdot 1000}{A_s} = \frac{283,529 \cdot 1000}{1600} = 177,205 \text{ mm}$$

- Dipakai **D19-150**

## 3. Bagian Bawah

- Tebal *web* bawah,  $t_5 = 0,30 \text{ m} = 300 \text{ mm}$
- Rasio tulangan susut,  $\rho = 0,4\%$
- Luas tulangan susut,  $A_s = \rho \cdot t_5 \cdot 1000 = 0,4 \cdot 300 \cdot 1000 = 1200 \text{ mm}^2$
- Jarak tulangan yang diperlukan :

$$s = \frac{A_{1D} \cdot 1000}{A_s} = \frac{283,529 \cdot 1000}{1200} = 236,27 \text{ mm}$$

- Dipakai **D19-200**

## 4. Bagian Atas

- Tebal *web* bawah,  $t_5 = 0,30 \text{ m} = 300 \text{ mm}$
- Rasio tulangan susut,  $\rho = 0,4\%$
- Luas tulangan susut,  $A_s = \rho \cdot t_5 \cdot 1000 = 0,4 \cdot 300 \cdot 1000 = 1200 \text{ mm}^2$
- Jarak tulangan yang diperlukan :

$$s = \frac{A_{1D} \cdot 1000}{A_s} = \frac{283,529 \cdot 1000}{1200} = 236,27 \text{ mm}$$

e. Dipakai **D19-200**

### 5.2.13. Perhitungan Tulangan Geser

#### 1. Gaya Geser Pada Balok Prategang

- Gaya geser pada *box girder* prategang dapat dilihat pada Tabel 5.61.
- Gaya geser akibat beban merata,  $V = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot L - Q \cdot x$
- Gaya geser akibat beban terpusat,  $V = \frac{1}{2} \cdot P$
- Data Pembebanan:

1) Beban balok ( <i>MS</i> Balok)	=	168,15	kN/m
2) Beban Mati Tambahan ( <i>MA</i> )	=	14,895	kN/m
3) Beban hidup + <i>DLA</i> :			
<i>QTD</i>	=	39,6	kN/m
<i>PTD</i>	=	68,6	kN
4) Beban Momen Rem ( <i>MTB</i> )	=	365,446	kNm
5) Beban Pejalan kaki ( <i>TP</i> )	=	3,375	kN/m
6) Beban Angin ( <i>EW</i> )	=	2,0736	kN/m
7) Beban Gempa ( <i>EQ</i> )	=	18,3045	kN/m

Perhitungan gaya geser yang terjadi pada balok prategang ditumpuan.

$$x = 0, L = 50 \text{ m}$$

a. Gaya geser akibat berat sendiri (*MS*),

$$V_{MS} = \frac{1}{2} \cdot Q_{MS} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 168,15 \cdot 50 = 4203,751 \text{ kN}$$

b. Gaya geser maksimum akibat beban mati tambahan (*MA*),

$$V_{MA} = \frac{1}{2} \cdot Q_{MA} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 14,895 \cdot 50 = 372,375 \text{ kN}$$

c. Gaya geser maksimum akibat beban lajur "D" (*TD*),

$$V_{TD} = \frac{1}{2} \cdot Q_{TD} \cdot L + \frac{1}{2} \cdot P_{TD} = \frac{1}{2} \cdot 39,6 \cdot 50 + \frac{1}{2} \cdot 68,6 = 1024,3 \text{ kN}$$

d. Gaya geser maksimum akibat gaya rem ( $TB$ ),

$$V_{TB} = \frac{M}{L} = \frac{365,446}{50} = 7,309 \text{ kN}$$

e. Gaya geser maksimum akibat beban pedestrian ( $Q_{TP}$ ),

$$V_{TP} = \frac{1}{2} \cdot Q_{TP} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 3,375 \cdot 50 = 84,375 \text{ kN}$$

f. Gaya geser maksimum akibat beban angin ( $Q_{EW}$ ),

$$V_{EW} = \frac{1}{2} \cdot Q_{EW} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 2,0736 \cdot 50 = 51,84 \text{ kN}$$

g. Gaya geser balok akibat beban gempa ( $EQ$ ),

$$V_{EQ} = \frac{1}{2} \cdot Q_{EQ} \cdot L = \frac{1}{2} \cdot 18,3045 \cdot 50 = 457,613 \text{ kN}$$

Untuk dapat mengetahui kombinasi gaya geser yang digunakan pada *box girder* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 5.60 dan Rekap gaya geser akibat kombinasi dapat dilihat pada Tabel 5.61 berikut ini.

Tabel 5.60 Kombinasi pembebanan desain tulangan geser balok prategang

No	Aksi Beban	Kode	Kombinasi			
			1	2	3	4
1	Berat sendiri	<i>KMS</i>	1.3	1.3	1.3	1.3
2	Beban mati tambahan	<i>KMA</i>	2	2	2	2
3	Beban lajur D	<i>KTD</i>	1.8	1	1	
4	Gaya rem	<i>KTB</i>	1.8	1	1	
5	Beban pedestrian	<i>KTP</i>		1.8		
6	Beban angin	<i>KEW</i>			1.2	
7	Beban gempa	<i>KEQ</i>				1

(Sumber : RSNI – T-02-2005)

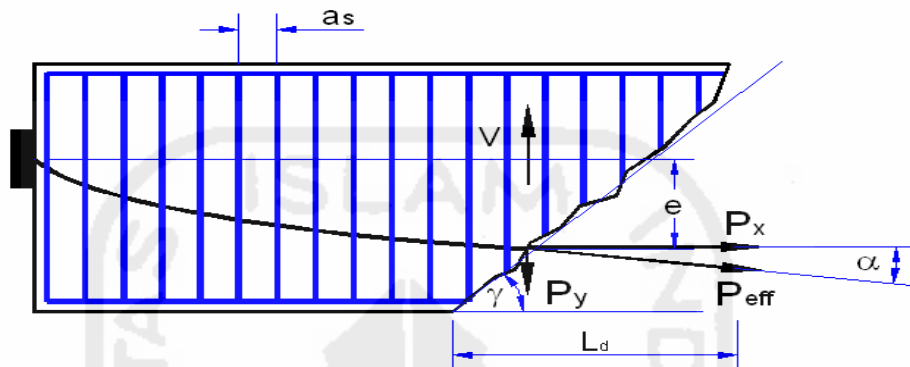


Tabel 5.61 Rekap gaya geser dan kombinasi gaya geser *box girder*

Jarak x (m)	Gaya Geser pada <i>Box Girder</i> Akibat Beban							KOMB I (kN)	KOMB II (kN)	KOMB III (kN)	KOMB IV (kN)
	<i>MS</i> (kN)	<i>MA</i> (kN)	<i>TD</i> (kN)	<i>TB</i> (kN)	<i>TP</i> (kN)	<i>EW</i> (kN)	<i>EQ</i> (kN)				
0	4203,75	372,38	1024,30	7,31	84,38	51,84	457,61	8066,52	7393,11	7303,44	6667,24
1,25	3993,56	353,76	974,80	7,31	80,16	49,25	434,73	7666,94	7025,53	6940,35	6333,88
2,5	3783,38	335,14	925,30	7,31	75,94	46,66	411,85	7267,36	6657,96	6577,26	6000,51
3,75	3573,19	316,52	875,80	7,31	71,72	44,06	388,97	6867,78	6290,38	6214,17	5667,15
5	3363,00	297,90	826,30	7,31	67,50	41,47	366,09	6468,20	5922,81	5851,08	5333,79
6,25	3152,81	279,28	776,80	7,31	63,28	38,88	343,21	6068,62	5555,23	5487,98	5000,43
7,5	2942,63	260,66	727,30	7,31	59,06	36,29	320,33	5669,03	5187,66	5124,89	4667,07
8,75	2732,44	242,04	677,80	7,31	54,84	33,70	297,45	5269,45	4820,08	4761,80	4333,70
10	2522,25	223,43	628,30	7,31	50,63	31,10	274,57	4869,87	4452,51	4398,71	4000,34
11,25	2312,06	204,81	578,80	7,31	46,41	28,51	251,69	4470,29	4084,93	4035,62	3666,98
12,5	2101,88	186,19	529,30	7,31	42,19	25,92	228,81	4070,71	3717,36	3672,53	3333,62
13,75	1891,69	167,57	479,80	7,31	37,97	23,33	205,93	3671,13	3349,78	3309,43	3000,26
15	1681,50	148,95	430,30	7,31	33,75	20,74	183,05	3271,55	2982,21	2946,34	2666,90
16,25	1471,31	130,33	380,80	7,31	29,53	18,14	160,16	2871,97	2614,63	2583,25	2333,53
17,5	1261,13	111,71	331,30	7,31	25,31	15,55	137,28	2472,38	2247,06	2220,16	2000,17
18,75	1050,94	93,09	281,80	7,31	21,09	12,96	114,40	2072,80	1879,48	1857,07	1666,81
20	840,75	74,48	232,30	7,31	16,88	10,37	91,52	1673,22	1511,91	1493,98	1333,45
21,25	630,56	55,86	182,80	7,31	12,66	7,78	68,64	1273,64	1144,33	1130,88	1000,09
22,5	420,38	37,24	133,30	7,31	8,44	5,18	45,76	874,06	776,76	767,79	666,72
23,75	210,19	18,62	83,80	7,31	4,22	2,59	22,88	474,48	409,18	404,70	333,36
25	0,00	0,00	34,30	7,31	0,00	0,00	0,00	74,90	41,61	41,61	0,00

## 2. Tulangan Geser Balok Prategang

Berdasarkan Tabel 5.61 diperoleh gaya geser *ultimite* terbesar pada ujung bentang pada kombinasi I. Berikut gambar tulangan geser pada *box girder* dapat dilihat pada Gambar 5.25.



Gambar 5.25 Tulangan geser *box girder*

( Sumber : Nugroho,2013 )

- Gaya geser ultimit rencana pada tumpuan,  $V_{ult} = 8066,52 \text{ kN}$
- Gaya geser ultimit rencana lapangan,  $V_{ult}' = 74,9 \text{ kN}$
- Tinggi balok,  $h = 2600 \text{ mm}$
- Tebal *web*,  $b = 400 \text{ mm}$
- Lebar total *web*,  $b_w = 3 \cdot 400 = 1200 \text{ mm}$
- Penutup beton,  $P_b = 30 \text{ mm}$
- Tinggi efektif,  
 $d = h - P_b - D_{tul \text{ sengkang}} / 2 = 2600 - 30 - 19 / 2 = 2560,5 \text{ mm}$
- Tegangan leleh baja,  $f_y = 300 \text{ MPa}$
- Kuat tekan beton,  $f'_c = 49,8 \text{ MPa}$
- Kekuatan beton menahan geser.

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b \cdot d = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{49,8} \cdot 1200 \cdot 2560,5 = 3613,84 \text{ kN}$$

- Faktor reduksi kekuatan geser,  $\phi = 0,7$ , maka:

$$\phi \cdot V_c = 0,7 \cdot 3613,84 = 2529,69 \text{ kN}$$

$$\frac{1}{2} \phi \cdot V_c = \frac{1}{2} \cdot 0,7 \cdot 3613,84 = 1264,85 \text{ kN}$$

$$V_{s,maks} = 2/3 \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 14455,3735 \text{ kN}$$

$$V_s = (V_u - \phi \cdot V_c) / \phi = 7909,7571 \text{ kN}$$

$$V_{s,min} = 1/3 \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d = 7227,6887 \text{ kN}$$

- l. Dari perhitungan diatas diperoleh:

$$V_{ult} = 8066,52 \text{ kN} < V_s = 14455,3735 \text{ kN} \text{ OK}$$

- m. Ukuran penampang dapat digunakan, tidak perlu diperbesar

$$V_s = 7909,7571 \text{ kN} < V_{s,maks} = 14455,3735 \text{ kN} \text{ OK}$$

- n. Diperlukan tulangan geser, bukan tulangan geser minimum

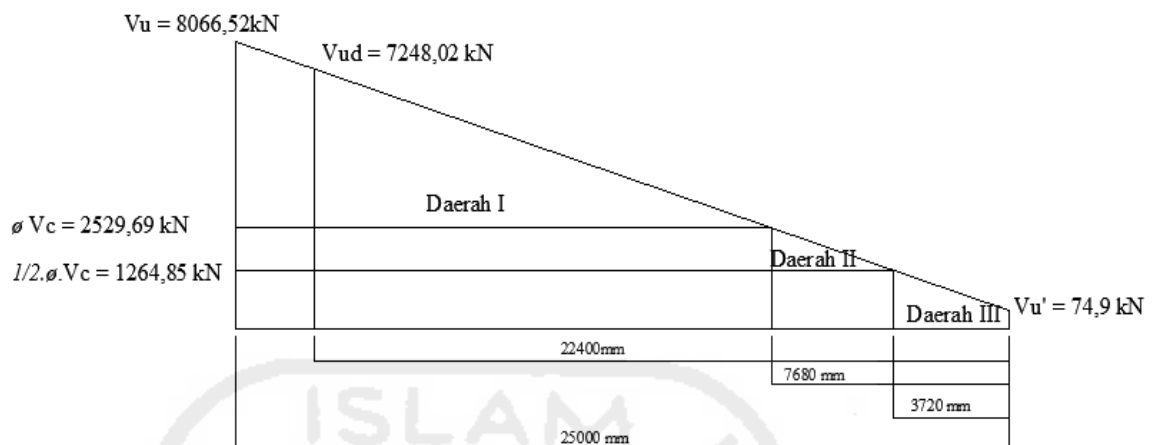
- o. Untuk itu ukuran penampang memenuhi atau dapat digunakan, tetapi diperlukan tulangan geser.  $V_u$  maks terletak sejauh  $d$  dari tumpuan:

$$V_{u,d} = \left[ \frac{\left(\frac{L}{2}\right) - d}{\left(\frac{L}{2}\right)} \right] \cdot (V_{ult} - V_{ult}') + V_{ult}'$$

$$V_{u,d} = \left[ \frac{\left(\frac{50000}{2}\right) - 2560,5}{\left(\frac{50000}{2}\right)} \right] \cdot (8066,52 - 74,9) + 74,9$$

$$V_{u,d} = 7248,02 \text{ kN}$$

Berikut dapat dilihat Gambar 5.26 mengenai diagram gaya geser *box girder* yang dibagiberdasarkan daerah-daerah pembebanan yang terjadi.

Gambar 5.26 Diagram gaya geser *box girder*

p. Koordinat titik-titik penting (lihat Gambar 5.24) :

q. Daerah I

$$X_1 = \frac{8066,52 - 74,9}{7248,02 - 74,9} \cdot \frac{50000}{2} = 22439,5 \text{ mm} = 22,4 \text{ m} ; \text{ dari tengah bentang}$$

r. Daerah II

$$X_2 = \frac{8066,52 - 74,9}{2529,69 - 74,9} \cdot \frac{50000}{2} = 7679,2628 \text{ mm} = 7,68 \text{ m} ; \text{ dari tengah bentang}$$

s. Daerah III

$$X_3 = \frac{1264,81 - 74,9}{8066,52 - 74,9} \cdot \frac{50000}{2} = 3722,37 \text{ mm} = 3,72 \text{ m} ; \text{ dari tengah bentang}$$

t. Jumlah kaki sengkang,  $nt = 4$  buah, digunakan diameter tulangan 19 mm

u. Luas tulangan geser sengkang,

$$A_v = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \cdot nt = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 19^2 \cdot 4 = 1134,11 \text{ mm}^2$$

v. Daerah I:

$$a) A_v \cdot u = \frac{V_s \cdot S}{f_y \cdot d} = \frac{7909,7571 \cdot 1000}{49,82560,5} = 62,031 \text{ mm}^2$$

$$b) A_v.u = \frac{b.S}{f_y.3} = \frac{1200.1000}{49,8.3} = 8032,1285 \text{ mm}^2$$

$$c) A_v.u = \frac{75.\sqrt{f_c}.b.S}{f_y.1200} = \frac{75.\sqrt{49,8}.1200.1000}{300.1200} = 1764,2279 \text{ mm}^2$$

$$d) \text{ Jarak sengkang, } s = \frac{n.\frac{1}{4}.n.d^2.S}{A_v} = \frac{4.0,25.n.19^2.1000}{8032,1285} = 141,1973 \text{ mm}$$

e) Dipakai sengkang **4D19-140**

w. Daerah II

a) Bagian dengan lebar daerah 5196,5 mm dengan  $V_u = 6971,01 \text{ kN}$

$$b) A_v.u = \frac{b.S}{f_y.3} = \frac{1200.1000}{49,8.3} = 8032,1285 \text{ mm}^2$$

$$c) A_v.u = \frac{75.\sqrt{f_c}.b.S}{f_y.1200} = \frac{75.\sqrt{49,8}.1200.1000}{300.1200} = 1764,2279 \text{ mm}^2$$

$$d) \text{ Jarak sengkang, } s = \frac{n.\frac{1}{4}.n.d^2.S}{A_v} = \frac{2.0,25.n.19^2.1000}{1764,2279} = 321,41 \text{ mm} < 600 \text{ mm}$$

e) Dipakai sengkang **D19-320**

x. Daerah III :

a) Daerah tulangan geser minimum

b) Jarak sengkang, 600 mm

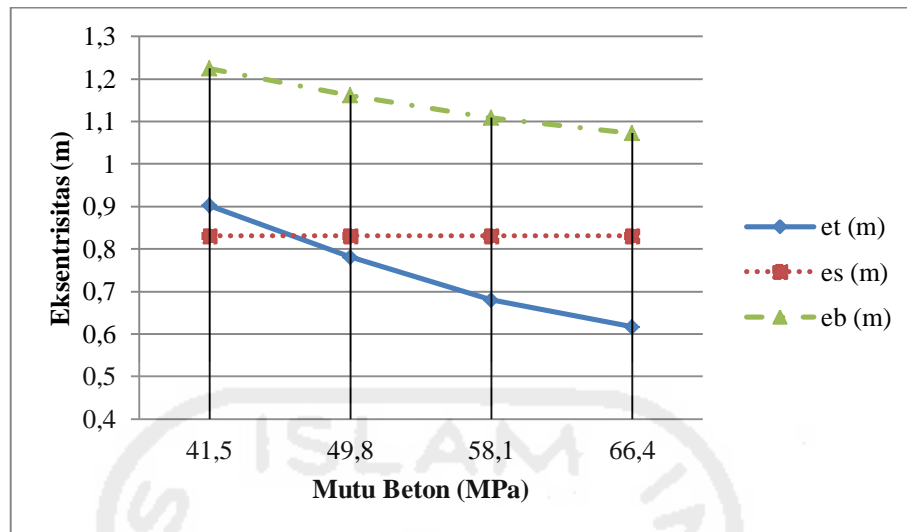
c) Dipakai sengkang **D19-600**

### 5.3 PEMBAHASAN

Dari hasil analisis di atas didapatkan berbagai macam variasi hasil dari jenis tinggi girder dan variasi mutu beton. Selanjutnya untuk mempermudah hasil pembahasan akan disampaikan dengan pembahasan dibawah ini.

#### 5.3.1. Eksentrisitas Tendon

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi tinggi *box girder* dan mutu beton dapat diperoleh bahwa terjadi perbedaan eksentrisitas tendon baja prategang. Variasi yang digunakan adalah tinggi 2 m; 2,2 m; 2,4 m; 2,6 m dan mutu beton 41,5 MPa; 49,8 MPa; 58,1 MPa; 66,4 MPa dan tinjauan yang dipaparkan pada kondisi jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah *box girder*,  $(z_0) = 0,3 \text{ m}$ .

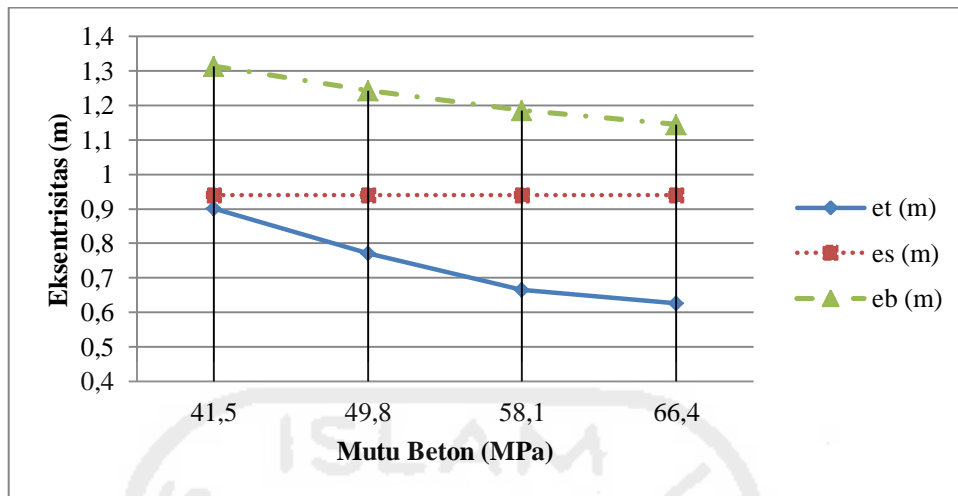


Gambar 5.27 Grafik eksentrisitas tendon sesuai perubahan  $f'c$  dengan tinggi *box girder* 2 meter pada bentang 50 meter

Tabel 5.62 Rekap eksentrisitas *box girder* tinggi 2 meter

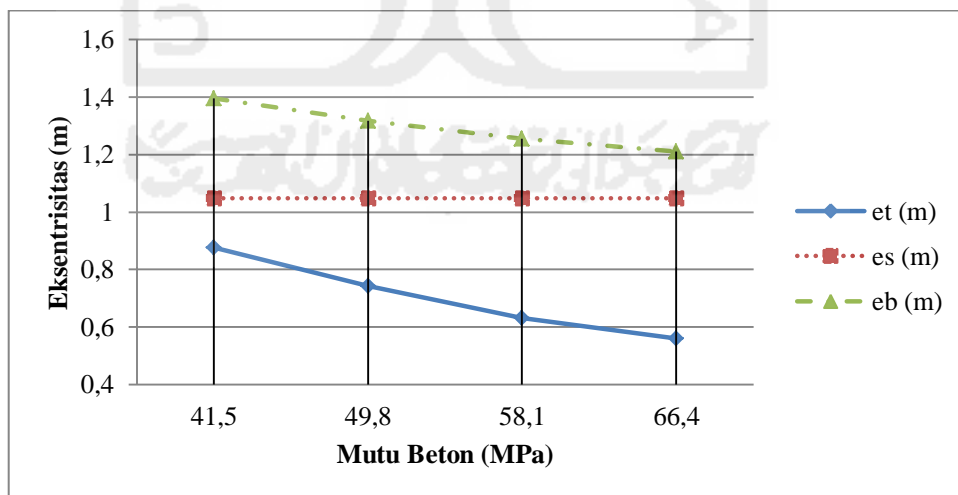
$f'c$	41,5 MPa	49,8 MPa	58,1 MPa	66,4 MPa
$e_t$ (m)	0,9025	0,7810	0,6801	0,5949
$e_s$ (m)	0,8306	0,8306	0,8306	0,8306
$e_b$ (m)	1,2248	1,1614	1,1087	1,0643

Dari Gambar 5.27 dan Tabel 5.62 dapat dilihat bahwa pada mutu beton 41,5 MPa dan tinggi *box girder* 2 meter eksentrisitas tendon tidak masuk syarat diantara batas atas ( $e_t$ ) dan batas bawah ( $e_b$ ). Sehingga pada perencanaan *box girder* dengan tinggi 2 meter diharapkan tidak menggunakan mutu beton 41,5 MPa.



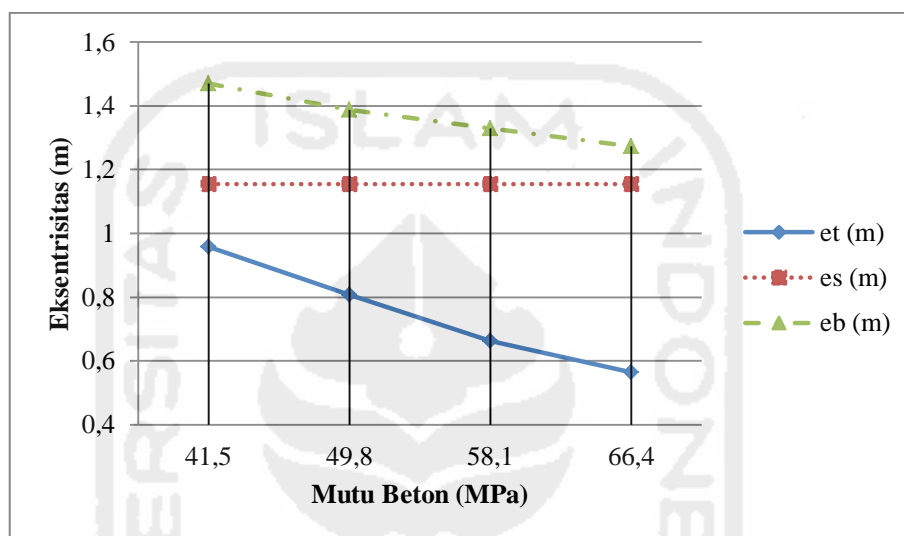
Gambar 5.28 Grafik eksentrisitas tendon sesuai perubahan  $f'c$  dengan tinggi *box girder* 2,2 meter pada bentang 50 meter

Dari Gambar 5.28 dapat dilihat bahwa pada mutu beton 41,5 MPa, 49,8 MPa, 58,1 MPa, 66,4 MPa dan tinggi *box girder* 2,2 meter eksentrisitas tendon masuk syarat diantara batas atas ( $e_t$ ) dan batas bawah ( $e_b$ ). Sehingga pada perencanaan *box girder* dengan tinggi 2,2 meter dapat digunakan ke empat macam variasi mutu beton tersebut.



Gambar 5.29 Grafik eksentrisitas tendon sesuai perubahan  $f'c$  dengan tinggi *box girder* 2,4 meter pada bentang 50 meter

Dari Gambar 5.29 dapat dilihat bahwa pada mutu beton 41,5 MPa, 49,8 MPa, 58,1 MPa, 66,4 MPa dan tinggi *box girder* 2,4 meter eksentrisitas tendon masuk syarat diantara batas atas ( $e_t$ ) dan batas bawah ( $e_b$ ). Sehingga pada perencanaan *box girder* dengan tinggi 2,4 meter dapat digunakan ke empat macam variasi mutu beton tersebut.



Gambar 5.30 Grafik eksentrisitas tendon sesuai perubahan  $f'c$  dengan tinggi *box girder* 2,6 meter pada bentang 50 meter

Dari Gambar 5.30 dapat dilihat bahwa pada mutu beton 41,5 MPa, 49,8 MPa, 58,1 MPa, 66,4 MPa dan tinggi *box girder* 2,6 meter eksentrisitas tendon masuk syarat diantara batas atas ( $e_t$ ) dan batas bawah ( $e_b$ ). Sehingga pada perencanaan *box girder* dengan tinggi 2,6 meter dapat digunakan ke empat macam variasi mutu beton tersebut.

Dari Gambar 5.25 – 5.28 didapatkan nilai  $e_s$  yang tetap pada masing masing variasi tinggi dengan perbedaan mutu beton ( $f'c$ ). Hal tersebut dikarenakan nilai  $e_s$  berpengaruh terhadap perubahan mutu beton dan berpengaruh terhadap perubahan tinggi dari *box girder* itu sendiri. Hal lain yang dapat dilihat dari Grafik diatas adalah dengan semakin bertambahnya mutu beton maka batas bawah maupun batas atas tendon semakin kecil. Hal itu tentunya akan berpengaruh terhadap variabel lain yang akan dibahas selanjutnya.

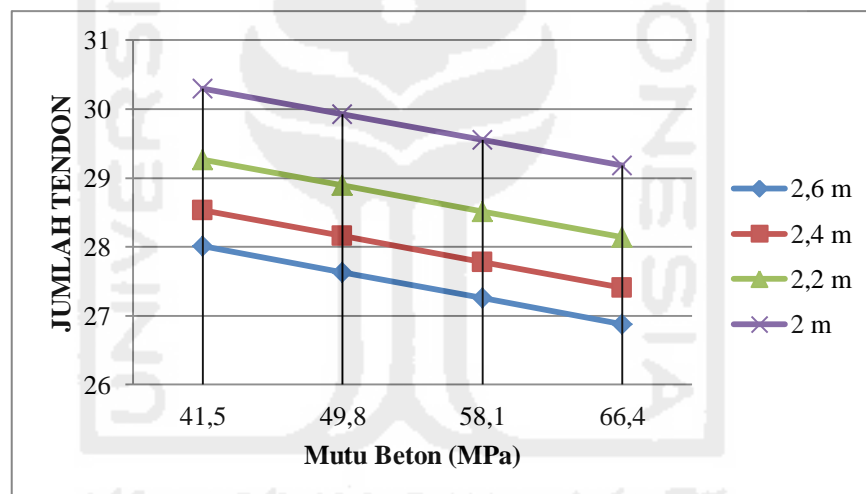


### 5.3.2. Kebutuhan Tendon

Kebutuhan tendon sendiri akan banyak dipengaruhi oleh beberapa faktor yang ada seperti perbedaan tinggi penampang *box girder*, eksentrisitas tendon, mutu beton yang digunakan serta tegangan yang akan diberikan pada masing masing beton prategang.

#### 1. Pengaruh Tinggi terhadap Kebutuhan Tendon

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi tinggi *box girder* dapat diperoleh bahwa terjadi perbedaan kebutuhan tendon baja prategang. Variasi yang digunakan adalah tinggi 2 m; 2,2 m; 2,4 m; 2,6 m dan mutu beton 41,5 MPa; 49,8 MPa; 58,1 MPa; 66,4 MPa. Hasil dari perhitungan dapat dilihat seperti pada Gambar 5.31.

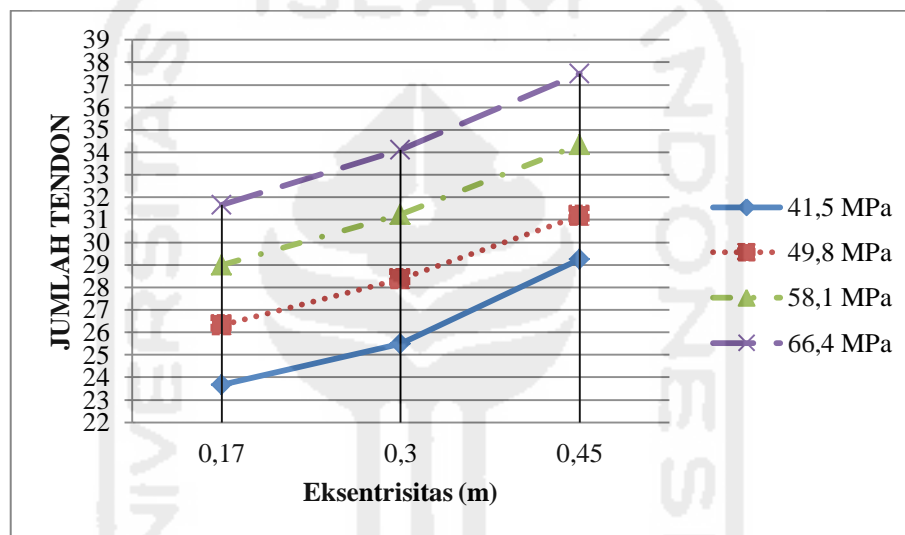


Gambar 5.31 Grafik kebutuhan tendon sesuai perubahan tinggi *box girder prestressed* bentang 50 meter akibat pengaruh mutu beton

Dari Gambar 5.31 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan jumlah kebutuhan tendon seiring dengan penambahan tinggi pada *box girder* tersebut. Hal tersebut terjadi sebagai akibat dari luasan tendon yang dibutuhkan semakin kecil dengan pertambahan tinggi *box girder* sebagai pengaruh gaya prategang awal yang semakin kecil serta luasan tekan dari penampang *box girder* yang semakin besar.

## 2. Pengaruh Eksentrisitas terhadap Kebutuhan Tendon

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi eksentrisitas yang digunakan dapat diperoleh bahwa terjadi perbedaan kebutuhan tendon baja prategang. Variasi eksentrisitas yang didapat adalah dengan menggunakan variasi nilai jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* ( $z_0$ ) dengan nilai 0,17 m; 0,3 m dan 0,45 m. Hasil dari perhitungan dapat dilihat seperti pada Gambar 5.32.



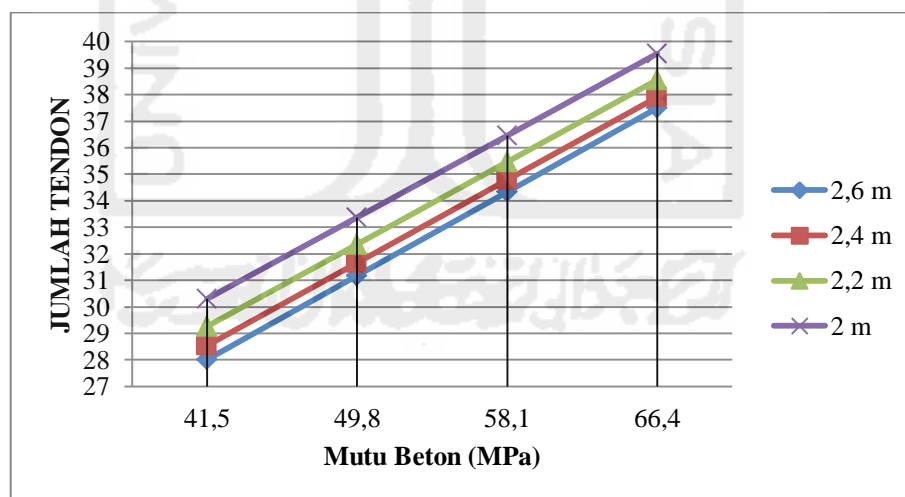
Gambar 5.32 Grafik kebutuhan tendon sesuai perubahan eksentrisitas *box girder prestressed* bentang 50 meter

Dari Gambar 5.32 maka dapat dilihat bahwa pada variasi  $z_0$  yang ada, menunjukkan penambahan kebutuhan tendon saat terjadi penambahan  $z_0$ . Hal tersebut terjadi dikarenakan ketika nilai  $z_0$  tinggi maka eksentrisitas tendon yang diperbolehkan kecil sehingga dibutuhkan tendon yang lebih banyak untuk mampu menahan eksentrisitas yang terjadi akibat beban. Hal itu akan berlaku sebaliknya ketika eksentrisitas yang diperbolehkan cukup besar.

### 3. Pengaruh Mutu Beton dan Tegangan transfer terhadap Kebutuhan Tendon

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi mutu beton yang digunakan dapat diperoleh bahwa terjadi perbedaan kebutuhan tendon baja prategang. Dapat dilihat pada pengaruh kebutuhan tendon yang lainnya dimana pada setiap kenaikan mutu beton maka akan terjadi penambahan kebutuhan tendon. Hal tersebut terjadi sebagai akibat tegangan yang digunakan semakin naik dengan bertambahnya mutu beton dan akan berpengaruh pada jumlah tendon yang dibutuhkan. Pada pembahasan ini akan dijelaskan beberapa keadaan dimana variasi tegangan yang digunakan akan dibuat sama dan berbeda sehingga akan terlihat bagaimana pengaruhnya terhadap kapasitas momen dari struktur *box girder* itu sendiri.

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi mutu beton yang ada dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer maka didapat hasil kebutuhan tendon seperti pada Gambar 5.33 dan Tabel 5.63 – Tabel 5.66.



Gambar 5.33 Grafik kebutuhan tendon sesuai perubahan mutu beton *box girder prestressed* bentang 50 meter dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer

Tabel 5.63 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,6 meter dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2,6			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	28,015	31,1739	34,3328	37,4916
tendon pakai	29	32	35	38

Tabel 5.64 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,4 meter dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2,4			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	28,5355	31,6626	34,7897	37,9167
tendon pakai	29	32	36	38

Tabel 5.65 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,2 meter dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer

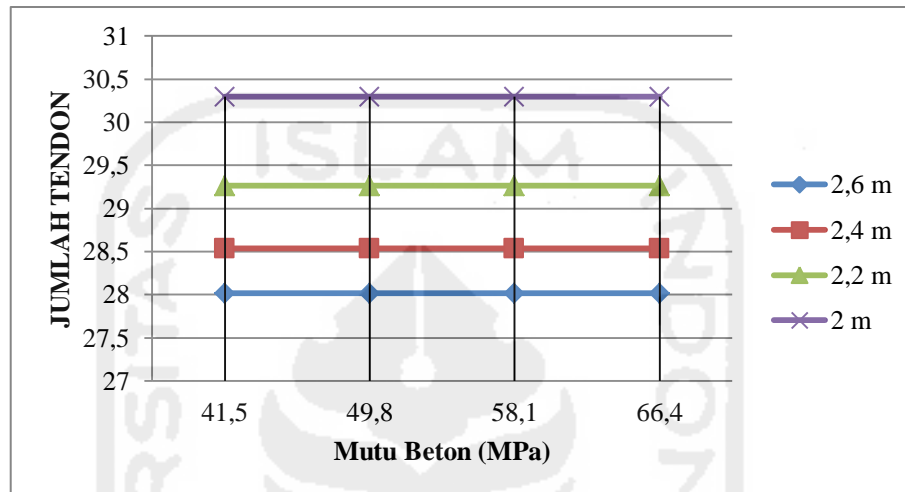
Tinggi (m)	2,2			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	29,2632	32,3631	35,4629	38,5628
tendon pakai	30	33	36	40

Tabel 5.66 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2 meter dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	30,2970	33,3774	36,4578	39,5382
tendon pakai	31	34	38	40

Dari Gambar 5.33 dan Tabel 5.63 – Tabel 5.66 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambah mutu beton akan berpengaruh dengan penambahan jumlah kebutuhan tendon. Hal ini terjadi sebagai akibat dari tegangan ijin yang semakin besar dan penambahan gaya prategang awal sebagai konsekuensi pertambahan mutu beton yang digunakan. Dengan pertambahan mutu beton ini maka tentunya akan di ikuti dengan kenaikan nilai momen kapasitas sebagai akibat dari luasan tendon yang digunakan.

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi mutu beton yang ada dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer maka didapat hasil kebutuhan tendon pada Gambar 5.34 dan Tabel 5.67 – Tabel 5.70.



Gambar 5.34 Grafik kebutuhan tendon sesuai perubahan mutu beton *box girder prestressed* bentang 50 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tabel 5.67 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,6 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2,6			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	28,0151	28,0151	28,0151	28,0151
tendon pakai	29	29	29	29

Tabel 5.68 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,4 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2,4			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	28,5355	28,5355	28,5355	28,5355
tendon pakai	29	29	29	29

Tabel 5.69 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,2 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

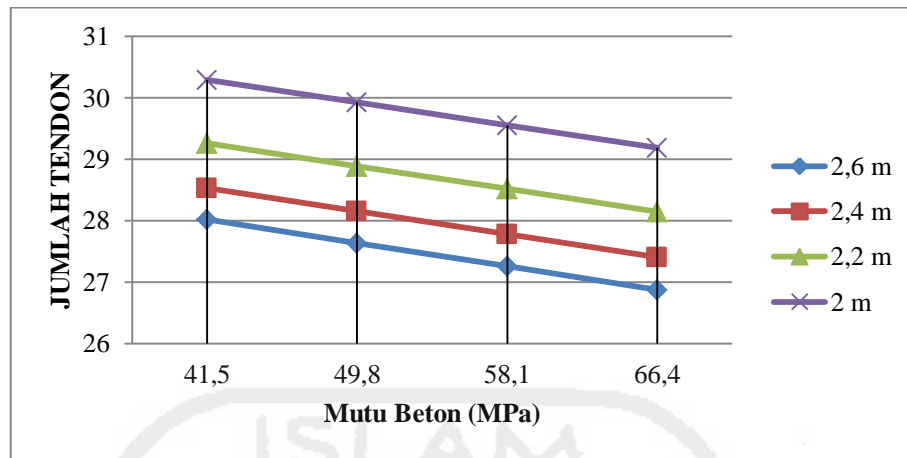
Tinggi (m)	2,2			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	29,2632	29,2632	29,2632	29,2632
tendon pakai	30	30	30	30

Tabel 5.70 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	30,2970	30,2970	30,2970	30,2970
tendon pakai	31	31	31	31

Dari Gambar 5.34 dan Tabel 5.67 – Tabel 5.70 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambah mutu beton maka jumlah kebutuhan tendon akan tetap sama. Hal ini terjadi sebagai akibat dari penggunaan tegangan transfer yang sama pada setiap variasi mutu beton yang digunakan. Pengaruh tegangan transfer yang sama maka akan berdampak pada gaya prategang awal yang sama, sehingga jumlah tendon yang akan digunakan sama.

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi mutu beton yang ada dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer maka didapat hasil kebutuhan tendon pada Gambar 5.35 dan Tabel 5.71 – Tabel 5.74.



Gambar 5.35 Grafik kebutuhan tendon sesuai perubahan mutu beton *box girder prestressed* bentang 50 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tabel 5.71 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,6 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2,6			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	28,0151	27,63452	27,25394	26,87336
tendon pakai	29	28	28	27

Tabel 5.72 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,4 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2,4			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	28,53554	28,15879	27,78203	27,40528
tendon pakai	29	29	28	28

Tabel 5.73 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2,2 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Tinggi (m)	2,2			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	29,2632	28,88973	28,51625	28,14278
tendon pakai	30	29	29	29

Tabel 5.74 Rekap penggunaan tendon pada tinggi *box girder* 2 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

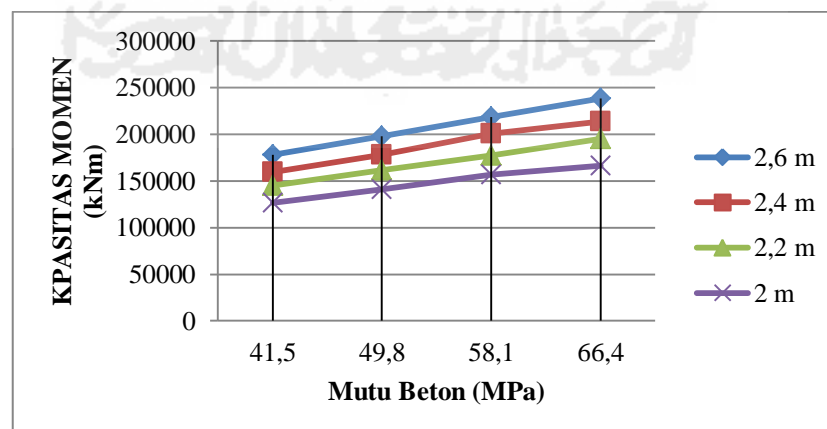
Tinggi (m)	2			
mutu beton (MPa)	41,5	49,8	58,1	66,4
tendon perlu	30,29703	29,92589	29,55476	29,18363
tendon pakai	31	30	30	30

Dari Gambar 5.35 dan Tabel 5.71 – Tabel 5.74 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambah mutu beton akan berpengaruh dengan penurunan jumlah kebutuhan tendon. Hal ini terjadi sebagai akibat dari tegangan ijin yang semakin kecil yang dapat digunakan pada setiap keadaan akhir mutu beton prategang yang akan mempengaruhi penurunan gaya prategang awal yang digunakan.

### 5.3.3. Kapasitas Momen *Box Girder Prestressed*

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi tegangan dan mutu beton dapat diperoleh bahwa terjadi perbedaan kapasitas momen *box girder*. Variasi yang digunakan adalah tinggi dan mutu beton

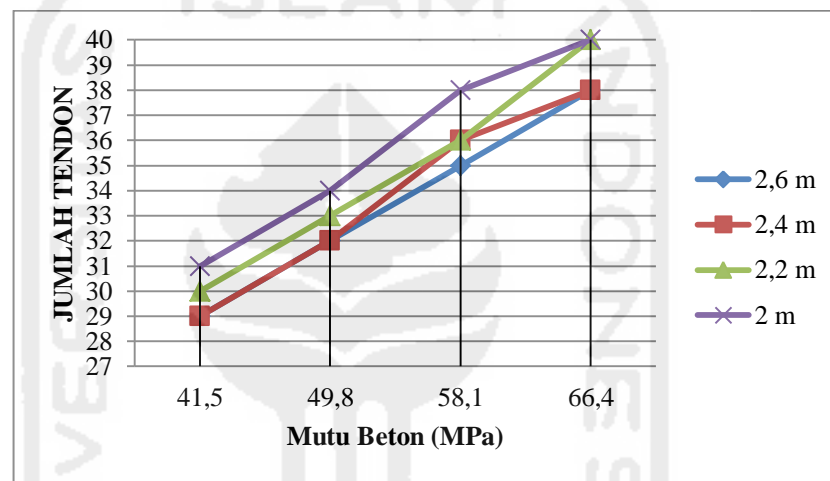
Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi mutu beton yang ada dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer maka didapat hasil momen kapasitas seperti pada Gambar 5.36.



Gambar 5.36 Grafik momen kapasitas sesuai perubahan mutu beton *box girder prestressed* bentang 50 meter dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer

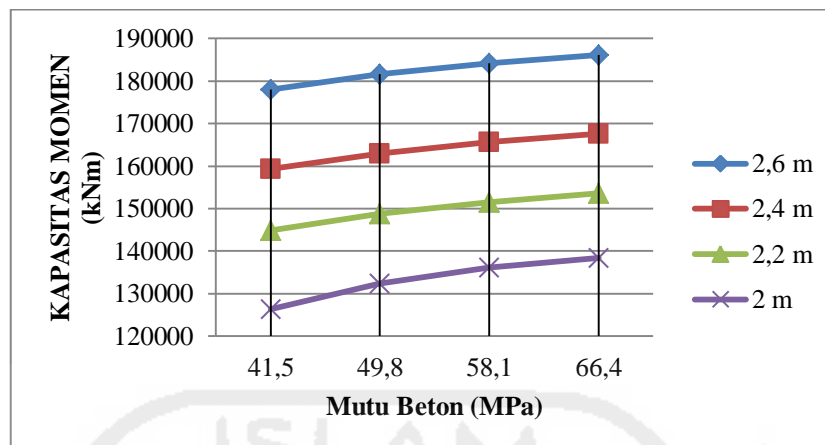


Dari Gambar 5.36 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambah mutu beton akan berpengaruh dengan penambahan momen kapasitas *box girder*. Dengan pertambahan mutu beton ini maka tentunya akan di ikuti dengan kenaikan nilai momen kapasitas sebagai akibat dari bertambahnya tegangan baja saat *jacking* yang dipengaruhi juga oleh pertambahan jumlah tendon yang diperlukan beserta jumlah luas aktual tendonnya. Berikut dapat dilihat penggunaan tendon pada setiap variasi yang ada pada Gambar 5.37.



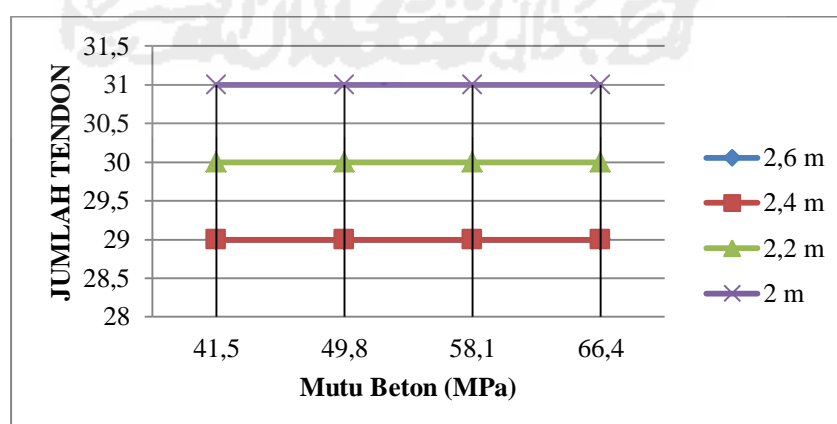
Gambar 5.37 Grafik penggunaan tendon dengan menggunakan tegangan ijin sebagai tegangan transfer

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi mutu beton yang ada dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer maka didapat momen kapasitas seperti pada Gambar 5.38.



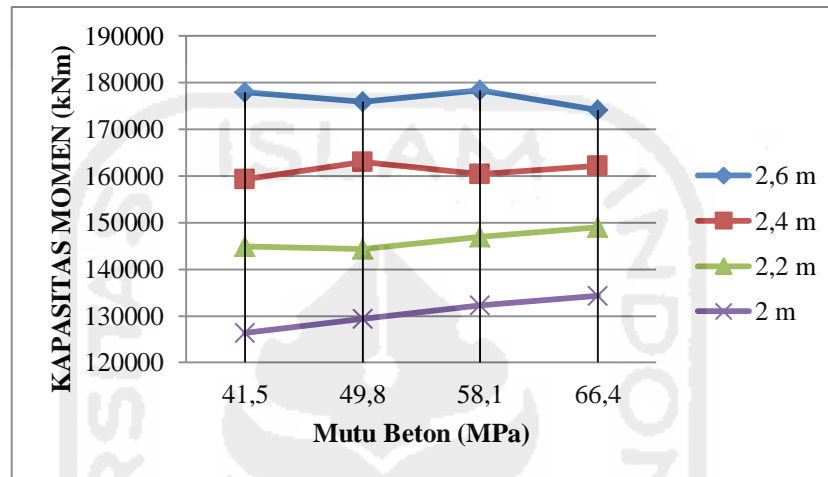
Gambar 5.38 Grafik momen kapasitas sesuai perubahan mutu beton *box girder prestressed* bentang 50 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Dari Gambar 5.38 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambah mutu beton akan berpengaruh dengan penambahan momen kapasitas *box girder* meskipun nilai tegangan ijin yang digunakan sama. Hal ini terjadi sebagai akibat tetap tingginya tegangan dari keadaan layan masing-masing variasi mutu beton yang semakin tinggi. Sehingga dapat kita simpulkan selain dengan jumlah tendon maka momen kapasitas juga akan dipengaruhi oleh tegangan yang digunakan pada saat layan. Berikut dapat dilihat penggunaan tendon pada setiap variasi yang ada pada Gambar 5.39.



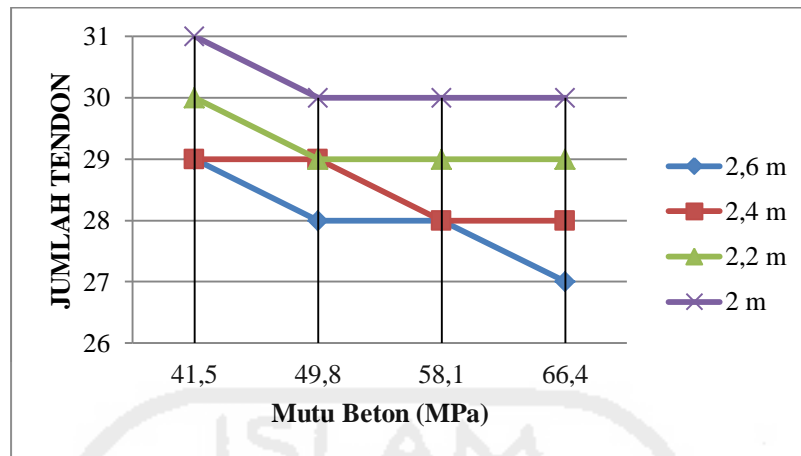
Gambar 5.39 Grafik penggunaan tendon dengan menggunakan tegangan ijin yang sama sebesar 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi mutu beton yang ada dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer maka didapat hasil seperti pada Gambar 5.40.



Gambar 5.40 Grafik momen kapasitas sesuai perubahan mutu beton *box girder prestressed* bentang 50 meter dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

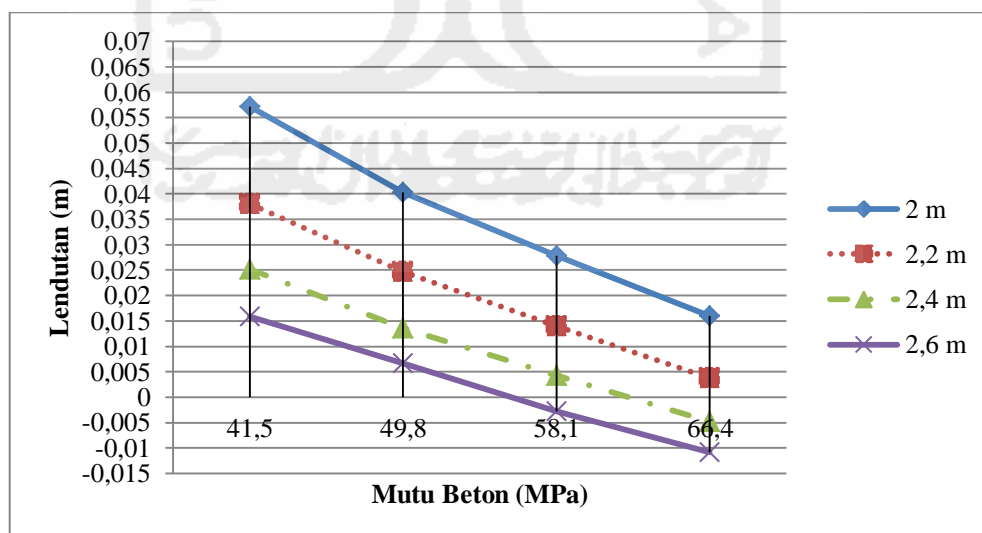
Dari Gambar 5.40 dapat dilihat bahwa dengan semakin bertambah mutu beton akan berpengaruh dengan penurunan momen kapasitas *box girder* dengan nilai tegangan ijin yang digunakan semakin kecil. Hal ini terjadi sebagai akibat penurunan jumlah tendon yang digunakan karena semakin kecilnya jumlah tendon yang dibutuhkan dan berdampak pada luas aktual tendon yang semakin kecil. Dari aspek tersebut kita juga harus memperhatikan nilai dari tegangan saat layan yang akan berpengaruh pada momen kapasitas yang menggunakan jumlah tendon yang sama seperti pada mutu 49,8 MPa dan 58,1 MPa. Berikut dapat dilihat penggunaan tendon pada setiap variasi yang ada pada Gambar 5.41.



Gambar 5.41 Grafik penggunaan tendon dengan menggunakan tegangan ijin yang lebih kecil 2,5% dari 41,5 MPa sebagai tegangan transfer

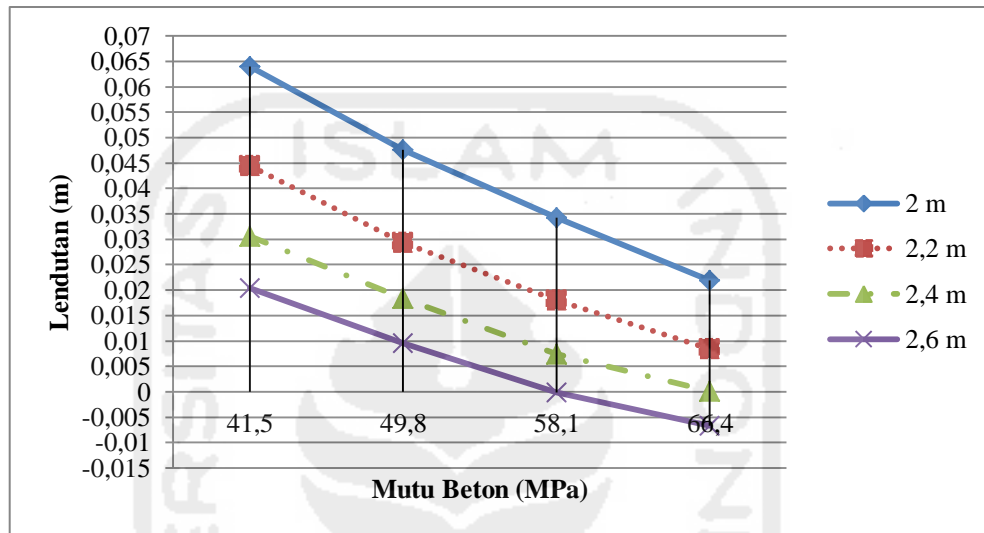
#### 5.3.4. Lendutan Pada *Box Girder Prestressed (Service)*

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang telah dilakukan terhadap variasi tinggi *box girder* dan mutu beton dapat diperoleh bahwa terjadi perbedaan lendutan *box girder*. Variasi yang digunakan adalah tinggi 2 m; 2,2 m; 2,4 m; 2,6 m dan mutu beton 41,5 MPa; 49,8 MPa; 58,1 MPa; 66,4 MPa serta diberikan juga variasi eksentrisitas tendon  $z_0 = 0,17$  m; 0,3m dan 0,45m



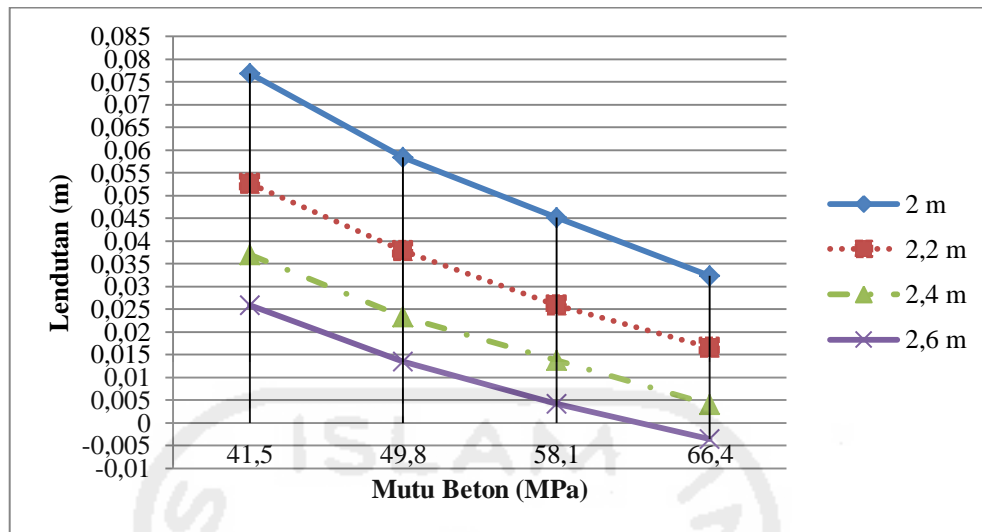
Gambar 5.42 Grafik lendutan pada variasi tinggi *box girder prestressed* bentang 50 meter sesuai perubahan  $f'c$  dengan menggunakan  $z_0 = 0,17$  m

Dari Gambar 5.42 maka dapat dilihat bahwa semakin besar mutu beton dan semakin tinggi *box girder* yang digunakan maka nilai dari lendutan akan semakin kecil, bahkan akan terjadi *chambers* atau lendutan balik pada tinggi 2,6 m dan 2,4 m dengan mutu beton 58,1 MPa dan 66,4 MPa.



Gambar 5.43 Grafik lendutan pada variasi tinggi *box girder prestressed* bentang 50 meter sesuai perubahan  $f'c$  dengan menggunakan  $z_0 = 0,3$  m

Dari Gambar 5.43 maka dapat dilihat bahwa semakin besar mutu beton dan semakin tinggi *box girder* yang digunakan maka nilai dari lendutan akan semakin kecil, bahkan akan terjadi *chambers* atau lendutan balik pada tinggi 2,6 m dengan mutu beton 66,4 MPa.



Gambar 5.44 Grafik lendutan pada variasi tinggi *box girder prestressed* bentang 50 meter sesuai perubahan  $f'c$  dengan menggunakan  $z_0 = 0,45$  m

Dari Gambar 5.44 maka dapat dilihat bahwa semakin besar mutu beton dan semakin tinggi *box girder* yang digunakan maka nilai dari lendutan akan semakin kecil, bahkan akan terjadi *chambers* atau lendutan balik pada tinggi 2,6 m dengan mutu beton 66,4 MPa.

Dari Gambar 5.42 sampai 5.44 dapat dilihat pergerakan lendutan yang terjadi pada masing-masing tinggi *box girder* dengan menggunakan variasi mutu beton dan eksentrisitas tendon. Dari hal tersebut juga dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya mutu beton dan tinggi maka akan semakin kecil lendutan yang terjadi. Hal tersebut sebagai akibat dari semakin besarnya gaya prategang efektif yang terjadi pada penambahan mutu beton, hal itu membuat nilai lendutan atas semakin besar sehingga mampu melawan lendutan bawah yang terjadi sebagai akibat dari pembebanan struktur. Dari Grafik tersebut juga dapat disimpulkan bahwa semakin kecil nilai  $z_0$  dan semakin besarnya eksentrisitas maka akan semakin kecil pula lendutan yang akan terjadi.

### 5.3.5. Tinggi dan Mutu Beton Optimal pada *Box Girder* Bentang 50 meter

Dari berbagai perhitungan trial menggunakan tinggi, eksentrisitas dan mutu beton pada gelagar *box girder prestressed* bentang 50 meter maka dapat dilihat

tinggi optimal yang digunakan dalam perencanaan *box girder prestressed* agar terjadi perencanaan yang efisien. Pada aspek awal yang dilihat untuk menentukan keoptimalan suatu tinggi *box girder* adalah dengan melihat daerah aman tendon yang terjadi. Dimana nilai  $e_s$  harus diantara nilai  $e_t$  dan nilai  $e_b$ . Dari aspek tersebut maka tinggi 2 meter pada *box girder* dianggap kurang optimal dikarenakan nilai  $e_s$  tidak berada diantara nilai  $e_t$  dan  $e_b$  pada mutu beton 41,5 MPa walaupun untuk mutu betonn lainnya telah masuk. Hal tersebut dikarenakan untuk mencapai suatu keoptimalan suatu struktur dianggap mampu memenuhi syarat di setiap variasinya. Hal itu dapat dilihat pada Gambar 5.27 sampai Gambar 5.30.

Kemudian untuk menentukan keoptimalan tinggi selanjutnya adalah dengan melihat lendutan *box girder* yang terjadi. Pada perencanaan suatu struktur lendutan pada sebuah struktur merupakan suatu hal yang wajar dengan catatan masih dalam batas yang diijinkan. Dalam Perencanaan *box girder* tersebut lendutan yang terjadi pada suatu struktur telah mencapai *chambers* atau lendutan balik sehingga struktur tidak terjadi lendutan kebawah melainkan keatas. Hal tersebut dinilai boros dan kurang efisien dalam suatu perencanaan. Melihat hal tersebut maka *box girder* dengan tinggi 2,4 m dan 2,6 m dianggap kurang optimal dikarenakan dengan nilai lendutan yang terjadi justru *chambers*. Hal itu dapat dilihat pada Gambar 5.42 sampai Gambar 5.44.

Dari kedua aspek yang telah dibahas sebelumnya maka tinggi 2,2 meter dimerupakan tinggi yang optimal terhadap bentang 50 meter karena sesuai dengan kriteria sebelumnya. Setelah mampu menentukan nilai tinggi yang optimal maka diharapkan juga mampu melihat kuat tekan beton yang optimal pada struktur *box girder* bentang 50 meter dengan tinggi 2,2 meter. Hal itu bisa dilihat dengan perbandingan antara kebutuhan tendon dan momen kapasitas yang terjadi pada struktur *box girder*. Hal itu bisa dilihat pada Tabel 5.75.

Tabel 5.75 Rekap kebutuhan tendon pada tinggi 2,2 meter

$f'c$ (MPa)	<b>41,5</b>	<b>49,8</b>	<b>58,1</b>	<b>66,4</b>
Tendon dibutuhkan (buah)	29,2632	28,8897	28,5163	28,1428
Tendon dipakai (buah)	30	29	29	29
kapasitas momen <i>ultimate box</i> (kNm)	144841	144409	147011	148963
Lendutan (m)	0,05271	0,04705	0,04371	0,04128

Dari Tabel 5.75 dapat dilihat keoptimalan pemakaian tendon dan momen kapasitas terhadap sebuah kebutuhan struktur. Maka mengacu hal tersebut mutu beton yang optimal digunakan pada struktur *box girder* dengan tinggi 2,2 meter adalah 49,8 MPa (K-600).

