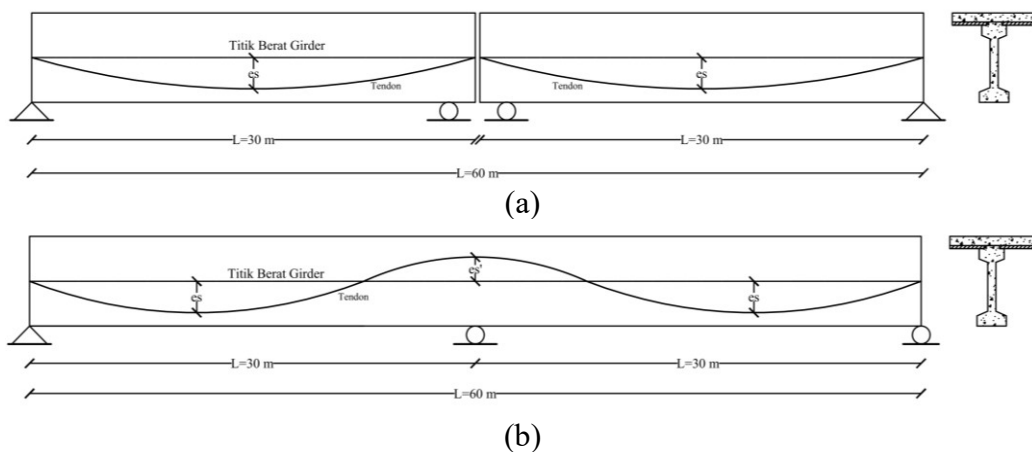


## BAB V DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Tinjauan Umum

Analisis struktur Jembatan Sambiroto menggunakan program Microsoft Excel 2016 dan SAP2000 v14. Perencanaan struktur jembatan dilakukan dua kali dengan menggunakan struktur yang berbeda. Perencanaan pertama menggunakan gelagar prategang balok sederhana, sedangkan desain yang kedua menggunakan gelagar balok menerus. Kedua desain menggunakan penampang *I-Girder* yang nantinya akan dibandingkan penampang hasil dari desain gelagar balok sederhana dengan balok menerus. Gambar sketsa perbandingan penampang memanjang jembatan balok sederhana dengan jembatan balok menerus dapat dilihat pada Gambar 5.1.



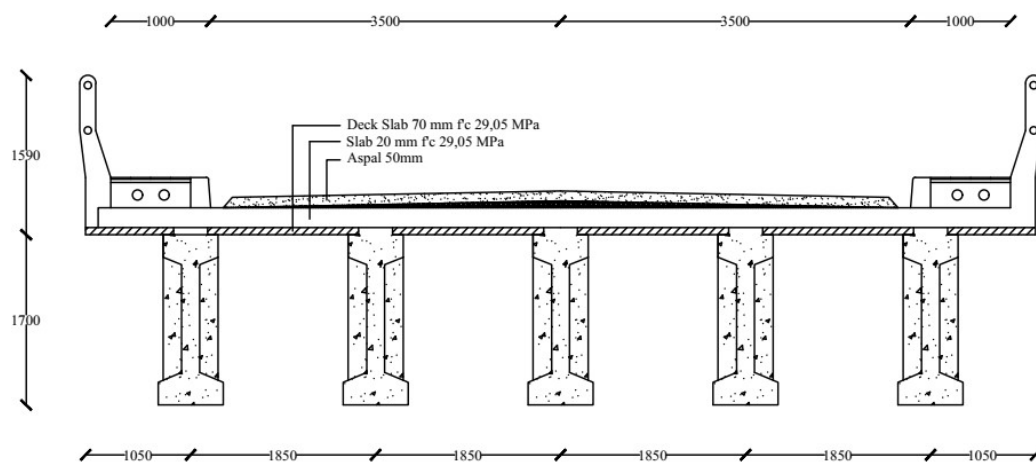
**Gambar 5. 1 Sketsa Penampang Memanjang Jembatan (a) Balok Sederhana  
(b) Balok Menerus**

#### 5.1.1 Data-Data Teknis Jembatan

Jembatan Sambiroto akan didesain menggunakan struktur balok prategang pascatarik dengan penampang *I-Girder* dengan data sebagai berikut.

1. Panjang total jembatan : 61,2 m
2. Panjang bentang jembatan : 30,6 m
3. Jarak antara balok prategang : 1,85 m
4. Tebal aspal : 0,05 m
5. Tinggi genangan air hujan : 0,05 m

Gambar potongan melintang Jembatan Sambiroto dapat dilihat pada Gambar 5.2.



**Gambar 5. 2 Potongan Melintang Jembatan**

### 5.1.2 Data Bahan

Berikut ini adalah mutu bahan yang digunakan dalam perencanaan Jembatan Sambiroto.

#### 1. Beton

- Beton prategang digunakan mutu beton K-500, setara dengan  $f'_c = 41.5$  MPa
- Beton yang digunakan untuk lantai (*slab*) jembatan adalah mutu K-350, setara dengan  $f'_c = 29,05$  MPa

#### 2. Baja Prategang

Spesifikasi baja prategang yang dipakai dalam perencanaan gelagar prategang dapat dilihat pada Tabel 5.1.

**Tabel 5. 1 Data Tendon Prategang**

DATA STRANDS CABLE – STANDARD VSL			
Jenis stands : ASTM A-416 grade 270			
Kuat tarik <i>strands</i>	$f_{pu}$	1860	MPa
Tegangan leleh <i>strands</i>	$f_{py}$	1675	MPa
Diameter nominal <i>strands</i>	$d$	12,7	mm
Luas tampang nominal satu <i>strands</i>	$A_{st}$	98,7	mm <sup>2</sup>
Beban putus satu <i>strands</i>	$P_{bsl}$	183,7	kN
Jumlah kawat satu untai ( <i>strands cable</i> )	$n$	12	<i>strands</i>
Modulus elastisitas <i>strands</i>	$E_s$	193000	MPa
Tipe dongkrak			

(Sumber : vsl.com, 13 Maret 2018)

### 3. Baja Non-Prategang

Berikut ini adalah mutu baja non-prategang yang digunakan dalam perencanaan Jembatan Sambiroto.

- Untuk baja  $\varnothing \geq 13\text{mm}$  digunakan mutu baja U-40, dengan tegangan leleh baja yang digunakan  $f_y = 400$  MPa.
- Untuk baja  $\varnothing < 13\text{mm}$  digunakan mutu baja U-24, dengan tegangan leleh baja yang digunakan  $f_y = 240$  MPa.

### 5.2 Perhitungan Penampang PCI-Girder

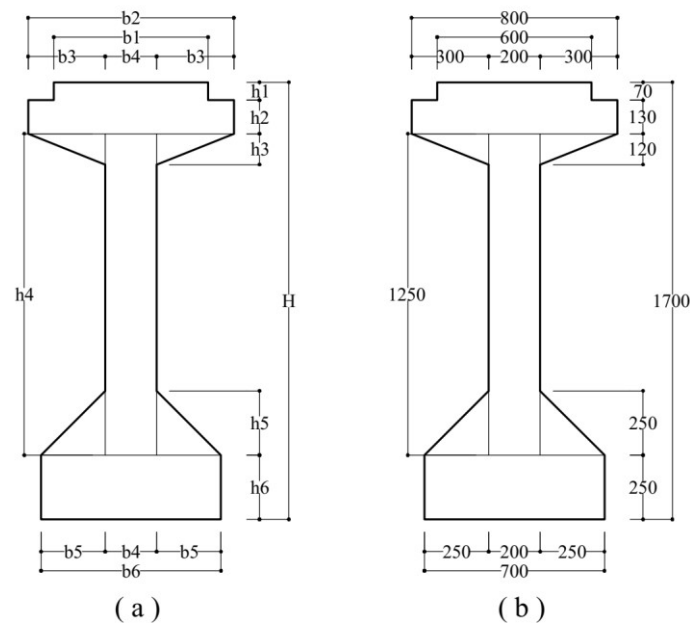
Penampang yang digunakan pada jembatan adalah penampang I. Mutu beton yang digunakan untuk balok prategang adalah beton K-500, setara dengan  $f'_c = 41,5$  MPa. Transfer gaya prategang dilakukan saat beton berusia 14 hari. Dimana kuat tekan beton pada usia tersebut baru mencapai 80%. Nilai kuat tekan beton pada saat transfer dapat dilihat pada perhitungan berikut.

$$f'_{ci} = 80\% \cdot f'_c = 0,8 \cdot 41,5 = 33,2 \text{ MPa}$$

Penampang PCI-Girder yang digunakan dalam perencanaan gelagar dibagi menjadi 2 yaitu penampang PCI-Girder dan penampang komposit. Penampang PCI-Girder dipakai pada saat transfer gaya prategang sedangkan penampang komposit dipakai pada saat kondisi layan.

### 1. Section Properties penampang I-Girder

Penampang *I-Girder* adalah penampang girder tanpa pelat lantai. Penampang *I-Girder* dipakai pada saat transfer gaya prategang. Gambar detail *PCI-girder* yang dipakai dapat dilihat pada Gambar 5.3.



**Gambar 5. 3 Penampang Melintang *PCI-Girder* (a) Notasi, (b) Dimensi**

Perhitungan *section properties* penampang *PCI-Girder* dengan dimensi seperti Gambar 5.3 dapat dilihat pada Tabel 5.2.

**Tabel 5. 2 Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Section Properties* Penampang *PCI***

No.	Dimensi		Luas Tampang A	Jarak thd alas y	Statis Momen A * y	Jarak thd Ttk Berat $\Delta y$	Momen Inersia A * $\Delta y^2$	Momen Inersia I <sub>0</sub>
	Lebar b	Tinggi h						
	( m )	( m )						
1	0,6	0,07	0,0420	1,6650	0,0699	0,8484	0,0302	0,00002
2	0,8	0,13	0,1040	1,5650	0,1628	0,7484	0,0583	0,00015
3	0,3	0,12	0,0360	1,4600	0,0526	0,6434	0,0149	0,00003
4	0,2	1,25	0,2500	0,8750	0,2188	0,0584	0,0009	0,03255
5	0,25	0,25	0,0625	0,3333	0,0208	0,4833	0,0146	0,00022
6	0,7	0,25	0,1750	0,1250	0,0219	0,6916	0,0837	0,00091
		Total :	0,6695		0,5467		0,2025	0,03387

Perhitungan *section properties* penampang *I-Girder* adalah sebagai berikut.

Tinggi penampang *I-Girder*,  $H = 1,7$  m

Luas penampang *I-Girder*,  $A = 0,6695$  m<sup>2</sup>

Titik berat PCI,

$$y_b = \frac{\sum(Ay)}{A} = \frac{0,5467}{0,6695} = 0,8166 \text{ m}$$

$$y_a = H - y_b = 1,7 - 0,8166 = 0,8834 \text{ m}$$

Momen inersia PCI,

$$\begin{aligned} I &= \sum I_0 + \sum (A \cdot \Delta y^2) \\ &= 0,03387 + 0,2025 \\ &= 0,2364 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Modulus penampang atas,

$$S_a = \frac{I}{y_a} = \frac{0,2364}{0,8834} = 0,2676 \text{ m}^3$$

Modulus penampang bawah,

$$S_b = \frac{I}{y_b} = \frac{0,2364}{0,8166} = 0,2895 \text{ m}^3$$

## 2. *Section Properties* penampang balok komposit (balok prategang+slab)

*Properties* penampang balok komposit adalah *properties* penampang balok ditambah *slab* yang sudah mencapai kuat beton maksimum.

Balok komposit memiliki penampang beton dengan dua nilai kuat tekan yang berbeda, dimana pada perhitungan ini, beton pelat memiliki kuat tekan 29,05 MPa sedangkan beton *PCI* memiliki kuat tekan 41,5 MPa. Untuk menyetarakan nilai kuat tekan yang berbeda, maka harus menghitung lebar pelat efektif terlebih dahulu. Perhitungan pelat efektif dapat dilihat pada perhitungan berikut.

Jarak antara balok prategang,  $s = B_e = 1,85$  m

Kuat tekan beton pelat,  $f'_{c \text{ pelat}} = 29,05$  MPa

Kuat tekan beton *PCI*,  $f'_{c \text{ PCI}} = 41,5$  MPa

Modulus elastis beton pelat lantai,

$$E_{c \text{ pelat}} = 4700 \cdot \sqrt{f'_{c \text{ pelat}}} = 4700 \cdot \sqrt{29,05} = 25332,08 \text{ MPa}$$

Modulus elastis beton PCI,

$$E_c \text{ PCI} = 35669,97 \text{ MPa}$$

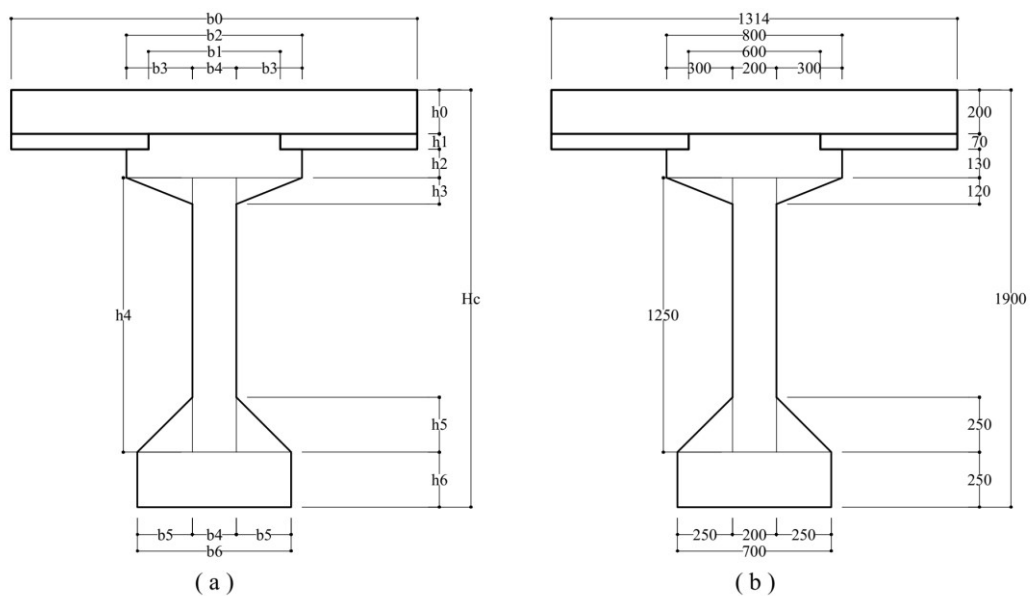
Rasio modulus elastisitas balok dan pelat,

$$n = \frac{E_c \text{ pelat}}{E_c \text{ PCI}} = \frac{25332,08}{35669,97} = 0,7102$$

Lebar efektif pelat lantai,

$$B_{eff} = n \cdot B_e = 0,7102 \cdot 1,85 = 1,3138 \text{ m}$$

Detail penampang melintang I-girder komposit dapat dilihat pada Gambar 5.4.



**Gambar 5. 4 Detail Penampang Melintang I-Girder Komposit (a) Notasi (b) Dimensi**

Rekapitulasi hasil perhitungan *section properties* balok komposit dengan dimensi sesuai dengan Gambar 5.4 dapat dilihat pada Tabel 5.3.

**Tabel 5. 3 Rekapitulasi Hasil Perhitungan *Section Properties* Balok Komposit**

No.	Dimensi		Luas Tampang	Jarak thd alas	Statis Momen	Jarak thd Ttk Berat	Momen Inersia	Momen Inersia
	Lebar	Tinggi						
	<i>b</i>	<i>h</i>	<i>A</i>	<i>y</i>	<i>A * y</i>	$\Delta y$	<i>A * <math>\Delta y^2</math></i>	<i>I<sub>co</sub></i>
	( m )	( m )	( m <sup>2</sup> )	( m )	( m <sup>3</sup> )	m	( m <sup>4</sup> )	( m <sup>4</sup> )
0	1,3138	0,2	0,2628	1,8	0,4730	0,7062	0,1311	0,00088
1	0,6	0,07	0,042	1,665	0,0699	0,5712	0,0137	0,00002
2	0,8	0,13	0,104	1,565	0,1628	0,4712	0,0231	0,00015
3	0,3	0,12	0,036	1,46	0,0526	0,3662	0,0048	0,00003
4	0,2	1,25	0,25	0,875	0,2188	0,2188	0,0120	0,03255
5	0,25	0,25	0,0625	0,333	0,0208	0,7604	0,0361	0,00022
6	0,7	0,25	0,175	0,125	0,0219	0,9688	0,1642	0,00091
		Total :	0,9323		1,0197		0,3850	0,03475

Perhitungan *section properties* penampang komposit adalah sebagai berikut.

Tinggi balok prategang komposit,  $H_c = 1,9$  m

Luas penampang I-Girder komposit,  $A_c = 0,9323$  m<sup>2</sup>

Titik berat PCI,

$$y_{bc} = \frac{\sum(A \cdot y)}{A_c}$$

$$= \frac{1,0197}{0,9323}$$

$$= 1,0938 \text{ m}$$

$$y_{ac} = H_c - y_{bc} = 1,9 - 1,0938 = 0,8062 \text{ m}$$

Momen inersia PCI,

$$I_c = \sum I_0 + \sum (A \cdot \Delta y^2)$$

$$= 0,03475 + 0,3850$$

$$= 0,4198 \text{ m}^4$$

Modulus penampang sisi atas pelat,

$$S_{ac} = \frac{I_c}{y_{ac}} = \frac{0,4198}{0,8062} = 0,5207 \text{ m}^3$$

Modulus penampang sisi atas balok,

$$S_{ac}' = \frac{I_c}{y_{ac} - h_0} = \frac{0,4198}{0,8062 - 0,2} = 0,6924 \text{ m}^3$$

Modulus penampang sisi bawah balok,

$$S_{bc} = \frac{I_c}{y_{bc}} = \frac{0,4198}{1,0938} = 0,3838 \text{ m}^3$$

Hasil perhitungan *section properties PCI-Girder* kondisi non-komposit dan kondisi komposit dapat dilihat pada Tabel 5.4.

**Tabel 5. 4 Section Properties PCI-Girder**

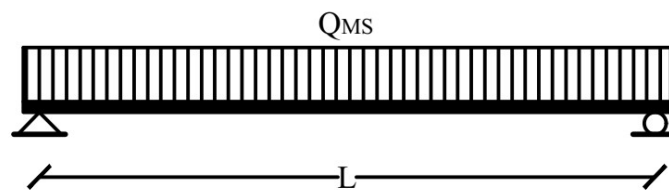
Tinjauan	Notasi	PCI-Girder Non-Komposit	PCI-Girder Komposit	Satuan
Luas penampang balok	$A$	0,6695	0,9323	$\text{m}^2$
Titik berat balok	$y_a$	0,8834	0,8062	m
	$y_b$	0,8166	1,0938	m
Momen inersia balok	$I$	0,2364	0,4198	$\text{m}^4$
Modulus penampang	$S_a$	-	0,5207	$\text{m}^3$
	$S'a$	0,2676	0,6924	$\text{m}^3$
	$S_b$	0,2895	0,3838	$\text{m}^3$

### 5.3 Pembebanan Balok Prategang

Pembebanan Jembatan Sambiroto ini mengacu pada Standar Pembebanan untuk Jembatan SNI-1725-2016 (2016).

#### 1. Berat Sendiri ( $MS$ )

Berat sendiri jembatan adalah berat bagian jembatan yang merupakan elemen struktural ditambah dengan elemen non struktural yang dianggap tetap. Pembebanan akibat berat sendiri bekerja seperti yang digambarkan pada Gambar 5.5.



**Gambar 5. 5 Pembebanan Berat Sendiri pada Balok**

Berat sendiri ( $MS$ ) terdiri dari berat beton prategang, berat diafragma, berat *deck slab*, dan beban pelat lantai jembatan.

#### a. Berat beton prategang

Berat beton prategang didapat dengan cara mengalikan luas penampang beton prategang ( $A$ ) dengan berat jenis beton prategang ( $wc$ ).



$$A = 0,6695 \text{ m}^2$$

$$w_c = 25,5 \text{ kN/m}^3$$

$$Q_{balok} = A \cdot w_c = 0,6695 \cdot 25,5 = 17,0723 \text{ kN/m}$$

b. Berat diafragma

Dimensi diafragma Jembatan Sambiroto adalah sebagai berikut:

Tebal,  $T = 0,2 \text{ m}$

Lebar,  $L = 1,65 \text{ m}$

Tinggi,  $H = 1,2 \text{ m}$

Berat jenis beton bertulang,  $w_c' = 25 \text{ kN/m}^3$

Berat diafragma per segmen,

$$W_{diaph} = T \cdot L \cdot H \cdot w_c = 0,2 \cdot 1,65 \cdot 1,2 \cdot 25 = 9,9 \text{ kN}$$

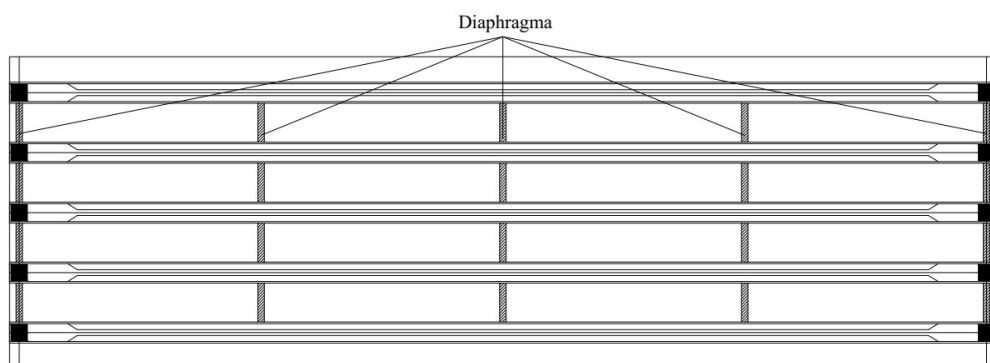
Panjang jembatan,  $L = 30 \text{ m}$

Jumlah diafragma,  $n = 5 \text{ buah}$

Reaksi tumpuan akibat berat diafragma,

$$R = \frac{n \cdot W_{dia}}{2} = \frac{5 \cdot 9,9}{2} = 24,75 \text{ kN}$$

Tampak atas balok prategang dengan diafragma dapat dilihat pada Gambar 5.6.



**Gambar 5. 6 Tampak Atas Balok Prategang dengan Diafragma**

Momen maksimum akibat berat diafragma adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} M &= -(0 + L/4 + L/2) \cdot W_{dia} + R \cdot L/2 \\ &= -(0 + 7,5 + 15) \cdot 9,9 + 24,75 \cdot 15 \\ &= 148,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Beban merata akibat berat diafragma,

$$Q_{dia} = \frac{8 \cdot M}{L^2} = \frac{8 \cdot 148,5}{30^2} = 1,32 \text{ kN/m}$$

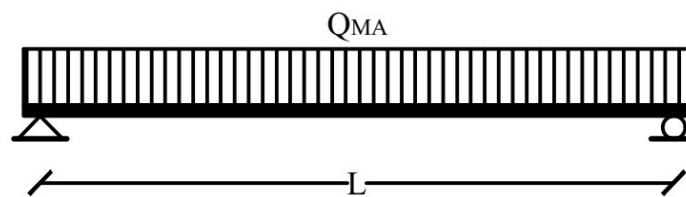
Selain berat sendiri *girder* dan diafragma, pelat lantai, dan *deck slab* juga merupakan berat sendiri jembatan. Rekapitulasi pembebanan akibat berat sendiri (*MS*) dapat dilihat pada Tabel 5.5.

**Tabel 5. 5 Rekapitulasi Pembebanan Akibat Berat Sendiri**

No.	Jenis beban berat sendiri	Lebar	Tebal	Berat Satuan	Beban
		<i>b</i> (m)	<i>h</i> (m)	<i>w</i> (kN/m)	<i>Q<sub>MS</sub></i> (kN/m)
1	Balok prategang				17,0723
2	Pelat lantai	1,85	0,2	25	9,2500
3	<i>Deck slab</i>	1,25	0,07	25	2,1875
4	Diafragma				1,3200
Total ( <i>MS</i> )					29,8298

## 2. Beban Mati Tambahan (*MA*)

Beban mati tambahan pada jembatan terdiri dari beban non struktural yang membebani secara permanen dan dianggap satu kesatuan yang utuh dalam jembatan. Beban mati tambahan bekerja seperti yang digambarkan pada Gambar 5.7.



**Gambar 5. 7 Pembebanan Beban Mati Tambahan**

Berdasarkan SNI-1725-2016 (2016), beban yang termasuk beban mati tambahan (*MA*) adalah sebagai berikut.

- Aspal beton setebal 50 mm.
- Genangan air setinggi 50 mm jika saluran drainase tidak bekerja dengan baik.

Perhitungan beban mati tambahan ( $MA$ ) dapat dilihat pada Tabel 5.6.

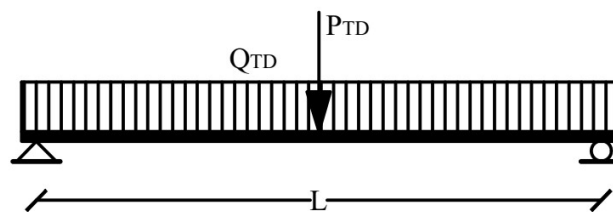
**Tabel 5. 6 Rekapitulasi Pembebanan Akibat Beban Mati Tambahan**

No.	Jenis Beban Mati Tambahan	Lebar	Tebal	Luas	Berat Satuan	Beban
		$b$	$h$	$A$	$w$	$Q_{MA}$
		(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/m)
1	Lapisan aspal + <i>overlay</i>	1.85	0.05	0.0925	22	2.035
2	Air hujan	1.85	0.05	0.0925	9.8	0.9065
					Total :	2.9415

### 3. Beban Lajur “D” ( $TD$ )

Beban lajur “D” terdiri dari beban terbagi rata ( $BTR$ ) dan beban garis ( $BGT$ ).

Pembebanan  $BTR$  dan  $BGT$  dapat dilihat pada Gambar 5.8.



**Gambar 5. 8 Pembebanan BTR dan BGT**

#### a. Beban terbagi rata ( $BTR$ )

Panjang bentang,  $L=30$  m, maka

$$q = 9 \text{ kPa}$$

Beban merata pada balok

$$\begin{aligned} Q_{TD} &= q \cdot s \\ &= 9 \cdot 1,85 \\ &= 16,65 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

#### b. Beban garis ( $BGT$ )

Beban garis ( $BGT$ ) adalah sebesar,

$$p = 49 \text{ kN/m}$$

Beban garis harus dikalikan dengan faktor beban dinamis ( $FBD$ ), dimana berdasarkan Gambar 3.8,  $FBD$  adalah sebesar 0,4 untuk Panjang bentang  $\leq 50$  m.

$$FBD=0,4$$

Beban terpusat pada balok dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} P_{TD} &= (1+FBD) \cdot p \cdot s \\ &= (1+0,4) \cdot 49 \cdot 1,85 \\ &= 126,91 \text{ kN} \end{aligned}$$

#### 4. Beban Rem ( $T_B$ )

Berdasarkan SNI-1725-2016 (2016), gaya rem harus diambil yang terbesar dari 25% dari berat gandar truk desain atau 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata ( $BTR$ ). Berikut ini adalah detail perhitungan dari dua metode perhitungan beban rem tersebut.

##### a. 25% dari berat gandar truk desain

$$\text{Berat Gandar} = 225 \text{ kN}$$

Beban rem,

$$HTB = 25\% \cdot 225 = 56,25 \text{ kN}$$

##### b. 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata ( $BTR$ )

$$\text{Berat truk rencana,} = 500 \text{ kN}$$

$$\text{Beban lajur terbagi rata (BTR)} \quad Q_{TD} = 16,65 \text{ kN/m}$$

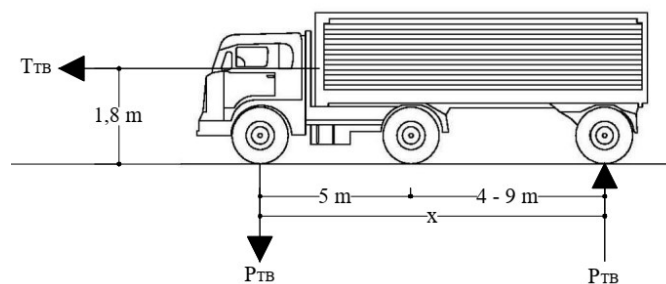
Beban rem,

$$HTB = 5\% \cdot 500 + 16,65 = 41,65 \text{ kN}$$

Maka dipakai gaya rem,

$$T_{TB} = 56,25 \text{ kN}$$

Gaya rem bekerja seperti yang digambarkan pada Gambar 5.9.



**Gambar 5.9 Pembebanan Rem pada Balok**

Berdasarkan Gambar 5.9, nilai  $P_{TB}$  dengan arah ke atas memiliki nilai yang sama dengan  $P_{TB}$  dengan arah ke bawah. Dengan asumsi tersebut, momen akibat gaya rem dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$M_1 = T_{TB} \cdot 1,8$$

$$M_2 = P_{TB} \cdot x$$

$M_1$  dan  $M_2$  memiliki nilai yang sama, sehingga nilai  $P_{TB}$  dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$P_{TB} \cdot x = T_{TB} \cdot 1,8$$

$$P_{TB} = \frac{1,8}{x} \cdot T_{TB}$$

Berdasarkan SNI-1725-2016, jarak gandar *trailer* dapat diubah ubah antara 4 sampai 9 m untuk mendapatkan pengaruh maksimum. Berdasarkan Gambar 5.9, jarak gandar diwakili dengan  $x$ , dimana untuk mendapatkan nilai  $P_{TB}$  maksimum maka digunakan lengan momen ( $x$ ) minimum yaitu sepanjang 4 m.

Menentukan nilai  $x$

$$x = 5 + 4$$

$$= 9 \text{ m}$$

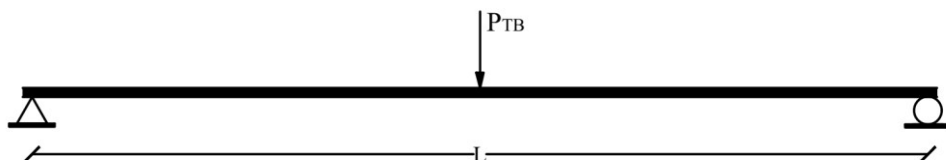
Beban titik akibat beban rem

$$P_{TB} = \frac{1,8}{x} \cdot T_{TB}$$

$$= \frac{1,8}{9} \cdot 56,25$$

$$= 11,25 \text{ kN}$$

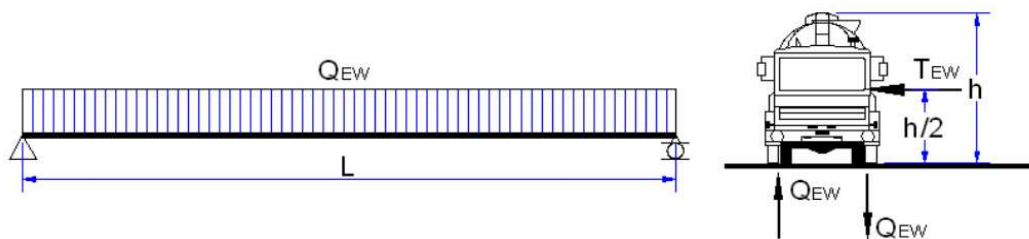
Gaya rem dianggap beban titik, seperti yang digambarkan pada Gambar 5.10, dimana gaya titik  $P_{TB}$  dapat diubah lokasinya untuk mendapatkan momen dan gaya geser maksimum pada balok.



**Gambar 5. 10 Beban Titik Akibat Gaya Rem pada Balok Sederhana**

### 5. Beban Angin Kendaraan ( $EW_L$ )

Berdasarkan SNI-1725-2016 (2016), beban angin kendaraan bekerja sebagai tekanan menerus sebesar  $T_{EW}=1,46$  kN/m. Bidang vertikal yang ditiup angin merupakan bidang samping kendaraan dengan tinggi  $h = 2,0$  m dari atas lantai jembatan, dan jarak antar roda kendaraan adalah  $x = 1,75$  m seperti yang digambarkan pada Gambar 5.11.



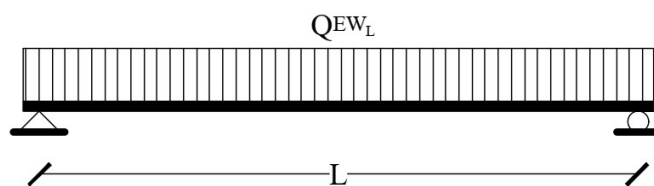
**Gambar 5. 11 Beban Angin pada Gelagar**

(Sumber : Ilham, 2008, 15 Maret 2017)

Dengan demikian, maka transfer angin ke jembatan dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} Q_{EWL} &= 0,5 \cdot \frac{h}{x} \cdot T_{EW} \\ &= 0,5 \cdot \frac{2}{1,75} \cdot 1,46 \\ &= 0,7509 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Beban angin bekerja pada gelagar jembatan digambarkan seperti Gambar 5.12.



**Gambar 5. 12 Pembebanan Akibat Beban Angin**

### 6. Pengaruh Temperatur Seragam ( $EU_n$ )

Pengaruh temperatur seragam dihitung dengan data-data sebagai berikut.

Perbedaan temperatur,	$\Delta T = 25$ °C
Koefisien muai panjang untuk beton,	$\alpha = 0,000011$ °C
Panjang bentang girder,	$L = 30$ m
Shear stiffness elastomeric bearing,	$k = 15000$ kN/m

Tinggi *PCI-Girder* komposit,  $H_c = 1,9 \text{ m}$

*Temperature movement*,

$$\begin{aligned}\delta &= \alpha \cdot \Delta T \cdot L \\ &= 0,000011 \cdot 25 \cdot 30 \\ &= 0,00825 \text{ m}\end{aligned}$$

Gaya akibat *temperature movement*,

$$\begin{aligned}F_{EU_n} &= k \cdot \delta \\ &= 15000 \cdot 0,00825 \\ &= 123,75 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Eksentrisitas,

$$\begin{aligned}e &= \frac{h}{2} \\ &= \frac{1,9}{2} \\ &= 0,95 \text{ m}\end{aligned}$$

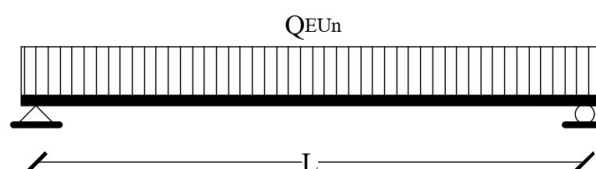
Momen akibat pengaruh temperatur,

$$\begin{aligned}M &= F_{EU_n} \cdot e \\ &= 123,75 \cdot 0,95 \\ &= 117,5625 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Beban merata akibat pengaruh temperatur,

$$\begin{aligned}Q_{EU_n} &= \frac{8 \cdot M}{L^2} \\ &= \frac{8 \cdot 117,5625}{30^2} \\ &= 1,045 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Beban akibat pengaruh temperatur seragam bekerja pada gelagar jembatan digambarkan seperti Gambar 5.13.



**Gambar 5. 13 Pembebanan Akibat Pengaruh Temperatur Seragam**

## 7. Beban Gempa ( $EQ$ )

Perhitungan beban gempa pada desain Jembatan Sambiroto ini mengacu pada Standar Pembebanan untuk Jembatan RSNI T-02-2005 (2005) dan Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Jembatan SNI-2833-2008 (2008).

Karakteristik Jembatan Sambiroto berdasarkan SNI-2833-2008 dapat menggunakan prosedur analisa tahan gempa beban seragam atau koefisien gempa.

Data-data yang diperlukan dalam perhitungan adalah sebagai berikut.

Percepatan gravitasi bumi,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Berat sendiri struktur,  $Q_{MS} = 29,8298 \text{ kN/m}$

Berat mati tambahan,  $Q_{MA} = 2,9415 \text{ kN/m}$

Panjang bentang,  $L = 30 \text{ m}$

Berat total struktur atas,

$$\begin{aligned} W_T &= (Q_{MS} + Q_{MA}) \cdot L \\ &= (29,8298 + 2,9415) \cdot 30 \\ &= 983,1375 \text{ kN} \end{aligned}$$

Momen inersia balok komposit,  $I_c = 0,4198 \text{ m}^4$

Modulus elastis,  $E_c = 35669,9725 \text{ MPa}$

$$E_c = 35669973 \text{ kPa}$$

Kekakuan balok prategang,

$$\begin{aligned} K_p &= 48 \cdot E_c \cdot \frac{I_c}{L^3} \\ &= 48 \cdot 35669973 \cdot \frac{0,4198}{30^3} \\ &= 26619,6569 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Waktu getar,

$$\begin{aligned} T &= 2\pi \sqrt{\frac{W_{TP}}{g \cdot K_p}} \\ &= 2\pi \sqrt{\frac{983,1375}{9,81 \cdot 26619,6569}} \\ &= 0,39 \text{ detik} \end{aligned}$$



Berdasarkan Gambar 3.11 , Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta terletak pada wilayah gempa 3 dan diasumsikan sebagai tanah lunak. Nilai koefisien geser dasar berdasarkan Gambar 3.12 adalah  $C=0,18$ .

Jumlah sendi plastis yang menahan deformasi lateral,  $n=1$ .

Faktor perangkakan,

$$\begin{aligned} F &= 1,25 - 0,025 \cdot n \\ &= 1,25 - 0,025 \cdot 1 \\ &= 1,225 \end{aligned}$$

Faktor tipe struktur,

$$\begin{aligned} S &= 1,3 \cdot F \\ &= 1,3 \cdot 1,225 \\ &= 1,5925 \end{aligned}$$

Koefisien beban gempa horizontal,

$$\begin{aligned} K_h &= C \cdot S \\ &= 1,8 \cdot 1,5925 \\ &= 0,2867 \end{aligned}$$

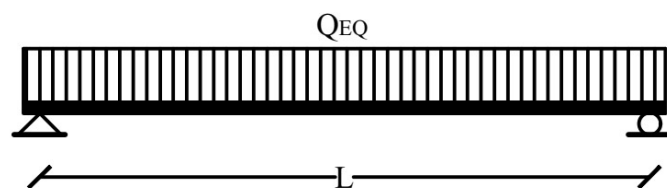
Berdasarkan SNI-2833-2008, faktor beban gempa vertikal adalah 0,5-0,67; sehingga koefisien gempa vertikal dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} K_v &= 0,5 \cdot K_h \\ &= 0,5 \cdot 0,2867 \\ &= 0,1433 \end{aligned}$$

Gaya gempa vertikal,

$$\begin{aligned} T_{EQ} &= K_v \cdot W_T \\ &= 0,1433 \cdot 983,1375 \\ &= 140,9082 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beban gempa bekerja pada balok seperti yang digambarkan pada Gambar 5.14.



**Gambar 5. 14 Pembebanan Akibat Beban Gempa**

Beban gempa vertikal,

$$\begin{aligned}
 Q_{EQ} &= \frac{T_{EQ}}{L} \\
 &= \frac{140,9082}{30} \\
 &= 4,6969 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

#### 8. Rekapitulasi Hasil Perhitungan Pembebanan Balok Prategang

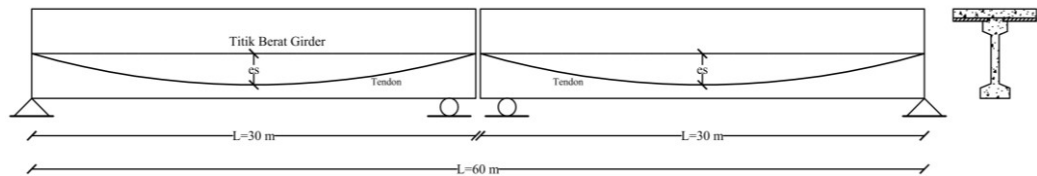
Rekapitulasi hasil perhitungan pembebanan jembatan pada poin 1-7 dapat dilihat pada Tabel 5.7.

**Tabel 5. 7 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Pembebanan Balok Prategang**

No.	Jenis Beban		$Q$ (kN/m)	$P$ (kN)	$M$ (kNm)
1	Berat balok prategang	<i>balok</i>	17,0723	-	-
2	Berat pelat	<i>pelat</i>	9,2500	-	-
3	Beton cor ditempat	<i>cor</i>	12,7575	-	-
4	Berat sendiri	<i>MS</i>	29,8298	-	-
5	Mati tambahan	<i>MA</i>	2,9415	-	-
6	Lajur "D"	<i>TD</i>	16,6500	126,9100	-
7	Gaya rem	<i>TB</i>	-	11,2500	-
8	Angin kendaraan	<i>EW</i>	0,7509	-	-
9	Temperatur seragam	<i>EUn</i>	1,0450	-	117,5625
10	Gempa	<i>EQ</i>	4,6969	-	-

## 5.4 Perhitungan Gelagar Prategang Balok Sederhana

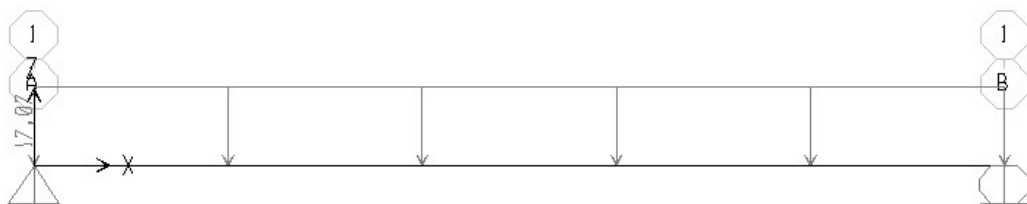
Pada sub bab ini akan dijabarkan proses perhitungan gelagar prategang penampang “I” yang ditumpu sederhana di kedua ujungnya. Ilustrasi tampak samping dari gelagar prategang struktur balok sederhana dapat dilihat pada Gambar 5.15.



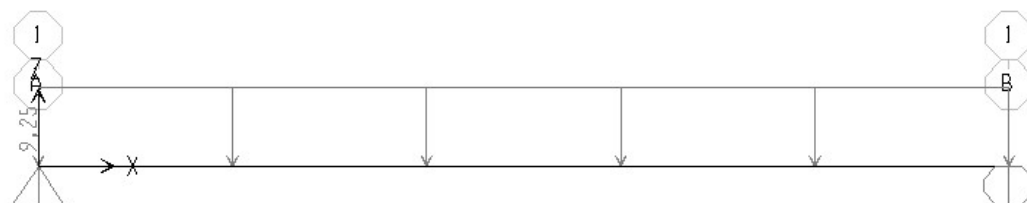
**Gambar 5. 15 Tampak Samping Gelagar Prategang Struktur Balok Sederhana**

### 5.4.1 Momen dan Gaya Geser

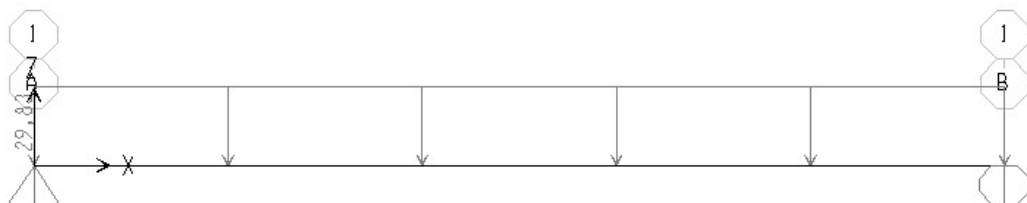
Analisis momen dan gaya geser pada balok menerus menggunakan program SAP2000 v14. Permodelan beban-beban menggunakan program SAP2000 v14 dapat dilihat pada Gambar 5.16-Gambar 5.24.



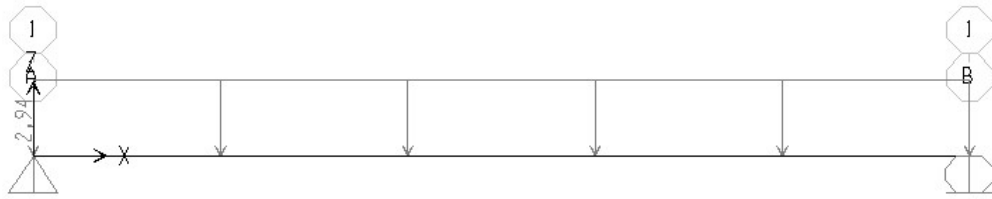
**Gambar 5. 16 Permodelan SAP2000 untuk Berat Sendiri PCI-Girder**



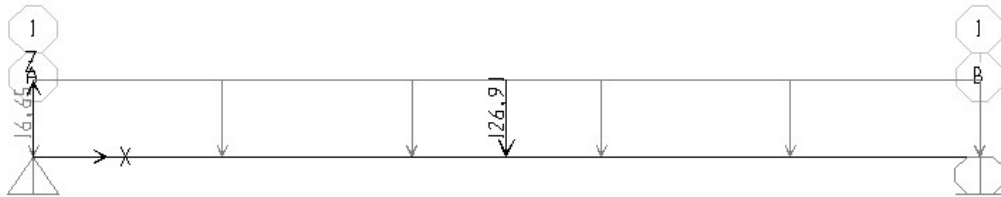
**Gambar 5. 17 Permodelan SAP2000 untuk Berat Pelat**



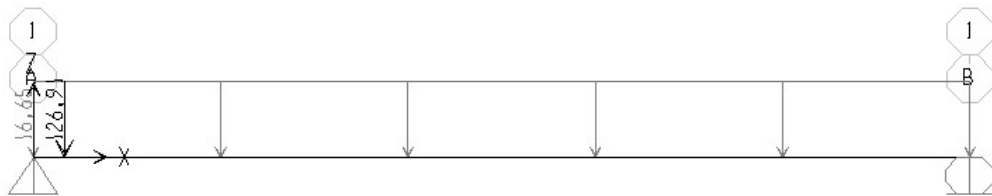
**Gambar 5. 18 Permodelan SAP2000 untuk Berat Sendiri Struktur (MS)**



**Gambar 5. 19 Permodelan SAP2000 untuk Beban Mati Tambahan (MA)**



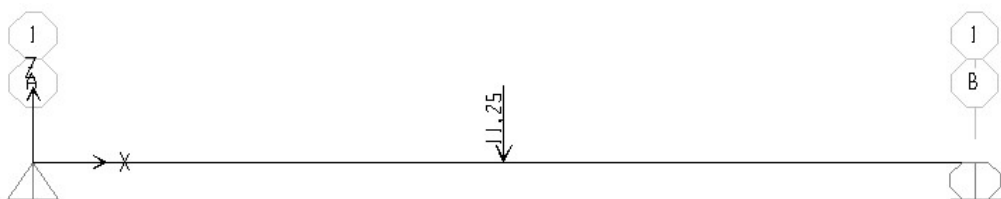
(a)



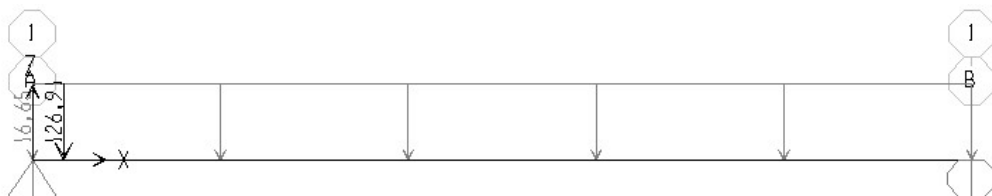
(b)

**Gambar 5. 20 Permodelan SAP2000 untuk Beban Lajur “D” (TD) (a) untuk Analisis Momen, (b) untuk Analisis Gaya Geser**

Pada Gambar 5.20, beban garis terpusat (*BGT*) ditempatkan pada tengah bentang untuk mendapatkan momen maksimum dan ditempatkan pada jarak 1 m dari tumpuan untuk mendapatkan gaya geser maksimum.



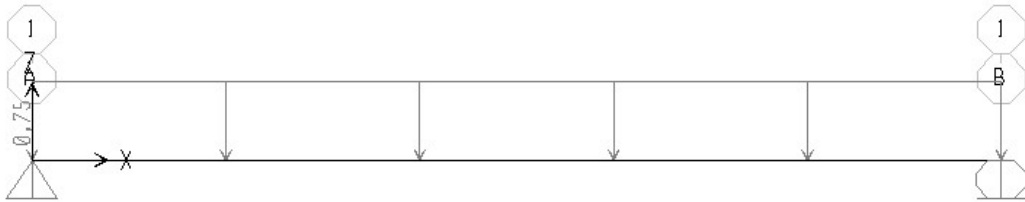
(a)



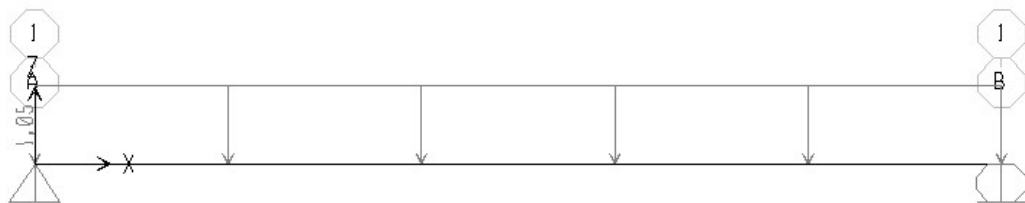
(b)

**Gambar 5. 21 Permodelan SAP2000 untuk Beban Rem (TB) (a) untuk Analisis Momen, (b) untuk Analisis Gaya Geser**

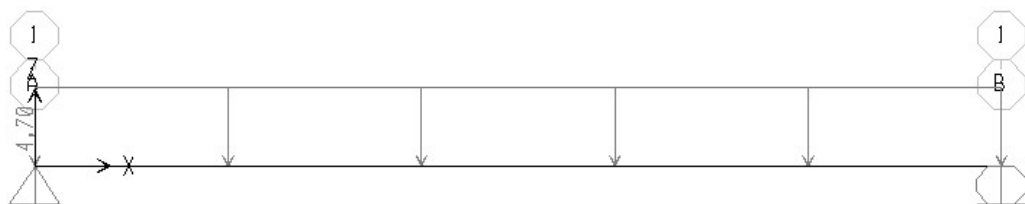
Pada Gambar 5.21, beban garis terpusat (*BGT*) ditempatkan pada tengah bentang untuk mendapatkan momen maksimum dan ditempatkan pada jarak 1 m dari tumpuan untuk mendapatkan gaya geser maksimum.



**Gambar 5. 22 Permodelan SAP2000 untuk Beban Angin Kendaraan ( $EW_L$ )**



**Gambar 5. 23 Permodelan SAP2000 untuk Beban Akibat Temperatur Seragam ( $EUn$ )**



**Gambar 5. 24 Permodelan SAP2000 untuk Beban Gempa ( $EQ$ )**

Hasil analisis gaya geser dan momen dapat dilihat pada Tabel 5.8 dan Tabel 5.10. Gaya geser dan momen ditambahkan dan dikali dengan faktor beban untuk mendapatkan beban ultimit. Gaya geser dan momen kombinasi dapat dilihat pada Tabel 5.9 dan Tabel 5.11.

**Tabel 5. 8 Momen Akibat Beban pada Balok Prategang**

Jarak X	Berat Balok (kNm)	Berat Pelat (kNm)	Berat Beton Cor (kNm)	Berat Sendiri MS (kNm)	Mati tambahan MA (kNm)	Lajur "D" TD (kNm)	Rem TB (kNm)	Angin EWL (kNm)	Temperatur Seragam	
									$EUn$ (kNm)	$EQ$ (kNm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	247,55	134,13	184,98	432,53	42,65	304,88	5,63	10,89	15,15	68,11
2	478,02	259,00	357,21	835,23	82,36	593,11	11,25	21,02	29,26	131,51
3	691,43	374,63	516,68	1208,10	119,13	864,69	16,88	30,41	42,32	190,23
4	887,76	481,00	663,39	1551,15	152,96	1119,62	22,50	39,04	54,34	244,24
5	1067,02	578,13	797,34	1864,36	183,84	1357,90	28,13	46,93	65,31	293,56
6	1229,20	666,00	918,54	2147,74	211,79	1579,53	33,75	54,06	75,24	338,18
7	1374,32	744,63	1026,98	2401,29	236,79	1784,51	39,38	60,44	84,12	378,10
7,5	1440,47	780,47	1076,41	2516,89	248,19	1880,76	42,19	63,35	88,17	396,30
8	1502,36	814,00	1122,66	2625,02	258,85	1972,84	45,00	66,08	91,96	413,33
9	1613,33	874,13	1205,58	2818,91	277,97	2144,52	50,63	70,96	98,75	443,86
10	1707,23	925,00	1275,75	2982,98	294,15	2299,55	56,25	75,09	104,50	469,69
11	1784,05	966,63	1333,16	3117,21	307,39	2437,93	61,88	78,46	109,20	490,83
12	1843,80	999,00	1377,81	3221,61	317,68	2559,66	67,50	81,09	112,86	507,27
13	1886,48	1022,13	1409,70	3296,19	325,04	2664,74	73,13	82,97	115,47	519,01
14	1912,09	1036,00	1428,84	3340,93	329,45	2753,17	78,75	84,10	117,04	526,06
15	1920,63	1040,63	1435,22	3355,85	330,92	2824,95	84,38	84,47	117,56	528,41

Tabel 5. 9 Momen Akibat Kombinasi Pembebanan

Jarak	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II	Daya Layan I	Daya Layan II	Daya Layan III	Daya Layan IV	Fatik
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
X												
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	1199,93	1075,73	641,02	641,02	651,91	784,10	778,09	814,76	897,02	741,77	493,37	232,88
2	2325,68	2083,94	1237,84	1237,84	1258,86	1515,55	1504,90	1578,09	1738,38	1436,20	952,71	453,27
3	3377,26	3024,63	1790,44	1790,44	1820,85	2194,35	2180,44	2290,00	2524,06	2083,27	1378,02	661,17
4	4354,66	3897,81	2298,84	2298,84	2337,88	2820,51	2804,69	2950,48	3254,07	2683,01	1769,31	856,59
5	5257,87	4703,46	2763,03	2763,03	2809,96	3394,02	3377,67	3559,53	3928,41	3235,40	2126,58	1039,52
6	6086,91	5441,60	3183,01	3183,01	3237,07	3914,88	3899,36	4117,16	4547,08	3740,44	2449,82	1209,96
7	6841,77	6112,22	3558,78	3558,78	3619,22	4383,10	4369,78	4623,36	5110,08	4198,14	2739,03	1367,91
7,5	7191,39	6422,21	3730,09	3730,09	3793,44	4597,47	4585,75	4857,18	5370,71	4409,24	2870,88	1442,21
8	7522,46	6715,32	3890,34	3890,34	3956,42	4798,67	4788,91	5078,14	5617,41	4608,49	2994,22	1513,38
9	8128,96	7250,90	4177,70	4177,70	4248,65	5161,60	5156,77	5481,49	6069,07	4971,50	3215,39	1646,36
10	8661,29	7718,97	4420,85	4420,85	4495,93	5471,88	5473,35	5833,41	6465,07	5287,17	3402,53	1766,85
11	9119,43	8119,51	4619,78	4619,78	4698,25	5729,51	5738,64	6133,91	6805,39	5555,48	3555,64	1874,85
12	9503,40	8452,54	4774,51	4774,51	4855,61	5934,50	5952,66	6382,98	7090,04	5776,46	3674,73	1970,37
13	9813,19	8718,04	4885,03	4885,03	4968,00	6086,84	6115,40	6580,62	7319,01	5950,08	3759,79	2053,40
14	10048,80	8916,03	4951,35	4951,35	5035,44	6186,53	6226,86	6726,84	7492,32	6076,36	3810,83	2123,94
15	10210,24	9046,51	4973,45	4973,45	5057,92	6233,58	6287,04	6821,64	7609,96	6155,30	3827,84	2181,99

Tabel 5. 10 Gaya Geser Akibat Beban pada Balok Prategang

Jarak X	Berat Balok (kN)	Berat Pelat (kN)	Berat Beton Cor (kN)	Berat Sendiri MS (kN)	Mati tambahan MA (kN)	Lajur "D" TD (kN)	Rem TB (kN)	Angin EWL (kN)	Temperatur Seragam	
									EU <sub>n</sub> (kN)	EQ (kN)
0	-256,09	-138,75	-191,36	-447,45	-44,12	-372,43	-10,88	-11,26	-15,68	-70,45
1	-239,01	-129,50	-178,61	-417,62	-41,18	-355,78	-10,88	-10,51	-14,63	-65,76
1	-239,01	-129,50	-178,61	-417,62	-41,18	-228,87	0,38	-10,51	-14,63	-65,76
2	-221,94	-120,25	-165,85	-387,79	-38,24	-212,22	0,38	-9,76	-13,59	-61,06
3	-204,87	-111,00	-153,09	-357,96	-35,30	-195,57	0,38	-9,01	-12,54	-56,36
4	-187,80	-101,75	-140,33	-328,13	-32,36	-178,92	0,38	-8,26	-11,50	-51,67
5	-170,72	-92,50	-127,58	-298,30	-29,42	-162,27	0,38	-7,51	-10,45	-46,97
6	-153,65	-83,25	-114,82	-268,47	-26,47	-145,62	0,38	-6,76	-9,41	-42,27
7	-136,58	-74,00	-102,06	-238,64	-23,53	-128,97	0,38	-6,01	-8,36	-37,58
8	-119,51	-64,75	-89,30	-208,81	-20,59	-112,32	0,38	-5,26	-7,32	-32,88
9	-102,43	-55,50	-76,55	-178,98	-17,65	-95,67	0,38	-4,51	-6,27	-28,18
10	-85,36	-46,25	-63,79	-149,15	-14,71	-79,02	0,38	-3,76	-5,23	-23,49
11	-68,29	-37,00	-51,03	-119,32	-11,77	-62,37	0,38	-3,00	-4,18	-18,79
12	-51,22	-27,75	-38,27	-89,49	-8,82	-45,72	0,38	-2,25	-3,14	-14,09
13	-34,15	-18,50	-25,52	-59,66	-5,88	-29,07	0,38	-1,50	-2,09	-9,39
14	-17,07	-9,25	-12,76	-29,83	-2,94	-12,42	0,38	-0,75	-1,05	-4,70
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,23	0,38	0,00	0,00	0,00
16	17,07	9,25	12,76	29,83	2,94	20,88	0,38	0,75	1,05	4,70
17	34,15	18,50	25,52	59,66	5,88	37,53	0,38	1,50	2,09	9,39
18	51,22	27,75	38,27	89,49	8,83	54,18	0,38	2,25	3,14	14,09
19	68,29	37,00	51,03	119,32	11,77	70,83	0,38	3,00	4,18	18,79
20	85,36	46,25	63,79	149,15	14,71	87,48	0,38	3,76	5,23	23,49
21	102,43	55,50	76,55	178,98	17,65	104,13	0,38	4,51	6,27	28,18
22	119,51	64,75	89,30	208,81	20,59	120,78	0,38	5,26	7,32	32,88



Tabel 5.10 Lanjutan

Jarak X	Berat Balok (kN)	Berat Pelat (kN)	Berat Beton Cor (kN)	Berat Sendiri <i>MS</i> (kN)	Mati tambahan <i>MA</i> (kN)	Lajur "D" <i>TD</i> (kN)	Rem <i>TB</i> (kN)	Angin <i>EWL</i> (kN)	Temperatur Seragam <i>EUn</i> (kN)	Gempa <i>EQ</i> (kN)
23	136,58	74,00	102,06	238,64	23,53	137,43	0,38	6,01	8,36	37,58
24	153,65	83,25	114,82	268,47	26,47	154,08	0,38	6,76	9,41	42,27
25	170,72	92,50	127,58	298,30	29,42	170,73	0,38	7,51	10,45	46,97
26	187,80	101,75	140,33	328,13	32,36	187,38	0,38	8,26	11,50	51,67
27	204,87	111,00	153,09	357,96	35,30	204,03	0,38	9,01	12,54	56,36
28	221,94	120,25	165,85	387,79	38,24	220,68	0,38	9,76	13,59	61,06
29	239,01	129,50	178,61	417,62	41,18	237,33	0,38	10,51	14,63	65,76
30	256,09	138,75	191,36	447,45	44,12	253,98	0,38	11,26	15,68	70,45

Tabel 5. 11 Gaya Geser Akibat Kombinasi Pembebanan

Jarak x	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II	Daya Layan I	Daya Layan II	Daya Layan III	Daya Layan IV	Fatik
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
0	-1353,08	-1199,76	-663,13	-663,13	-674,39	-829,76	-835,97	-904,95	-1008,68	-817,02	-510,38	-287,48
1	-1278,90	-1132,24	-618,92	-618,92	-629,43	-777,12	-784,69	-853,52	-953,01	-769,68	-476,35	-274,99
1	-1030,21	-938,81	-618,92	-618,92	-629,43	-735,67	-715,61	-715,36	-773,40	-659,15	-476,35	-171,37
2	-956,03	-871,29	-574,71	-574,71	-584,47	-683,02	-664,33	-663,94	-717,73	-611,81	-442,33	-158,88
3	-881,85	-803,78	-530,50	-530,50	-539,51	-630,38	-613,05	-612,51	-662,06	-564,46	-408,30	-146,40
4	-807,68	-736,26	-486,29	-486,29	-494,55	-577,73	-561,77	-561,08	-606,39	-517,12	-374,28	-133,91
5	-733,50	-668,74	-442,09	-442,09	-449,59	-525,08	-510,49	-509,66	-550,72	-469,77	-340,25	-121,42
6	-659,32	-601,22	-397,88	-397,88	-404,64	-472,44	-459,21	-458,23	-495,05	-422,42	-306,23	-108,93
7	-585,14	-533,70	-353,67	-353,67	-359,67	-419,79	-407,93	-406,80	-439,38	-375,08	-272,20	-96,45
8	-510,96	-466,18	-309,46	-309,46	-314,72	-367,14	-356,66	-355,38	-383,71	-327,73	-238,18	-83,96
9	-436,78	-398,66	-265,25	-265,25	-269,76	-314,50	-305,37	-303,95	-328,04	-280,39	-204,15	-71,47
10	-362,60	-331,15	-221,04	-221,04	-224,80	-261,85	-254,10	-252,53	-272,37	-233,04	-170,13	-58,98
11	-288,42	-263,63	-176,83	-176,83	-179,84	-209,20	-202,82	-201,10	-216,69	-185,70	-136,10	-46,50
12	-214,25	-196,11	-132,62	-132,62	-134,88	-156,56	-151,53	-149,67	-161,02	-138,35	-102,08	-34,01
13	-140,07	-128,59	-88,42	-88,42	-89,92	-103,91	-100,26	-98,25	-105,35	-91,01	-68,05	-21,52
14	-65,89	-61,07	-44,21	-44,21	-44,96	-51,26	-48,98	-46,82	-49,68	-43,66	-34,03	-9,03
15	8,29	6,45	0,00	0,00	0,00	1,38	2,30	4,60	5,99	3,68	0,00	3,45
16	82,47	73,97	44,21	44,21	44,96	54,03	53,58	56,03	61,66	51,03	34,03	15,94
17	156,65	141,48	88,42	88,42	89,92	106,68	104,86	107,46	117,33	98,38	68,05	28,43
18	230,83	209,00	132,63	132,63	134,88	159,32	156,14	158,88	173,00	145,72	102,08	40,92
19	305,00	276,52	176,83	176,83	179,84	211,97	207,42	210,31	228,67	193,07	136,10	53,40
20	379,18	344,04	221,04	221,04	224,80	264,62	258,70	261,74	284,34	240,41	170,13	65,89
21	453,36	411,56	265,25	265,25	269,76	317,26	309,98	313,16	340,01	287,76	204,15	78,38

Tabel 5.11 Lanjutan

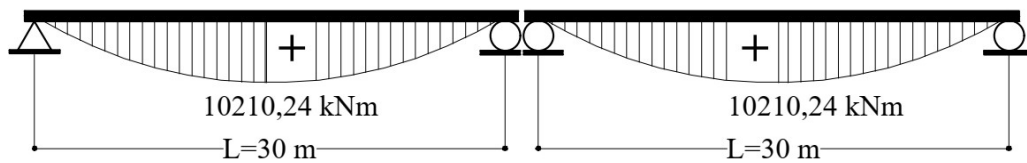
Jarak x	Kuat I (kN)	Kuat II (kN)	Kuat III (kN)	Kuat IV (kN)	Kuat V (kN)	Ekstrem I (kN)	Ekstrem II (kN)	Daya Layan I (kN)	Daya Layan II (kN)	Daya Layan III (kN)	Daya Layan IV (kN)	Fatik (kN)
22	527,54	479,08	309,46	309,46	314,72	369,91	361,26	364,59	395,68	335,10	238,18	90,87
23	601,72	546,59	353,67	353,67	359,67	422,55	412,54	416,01	451,35	382,45	272,20	103,35
24	675,90	614,11	397,88	397,88	404,64	475,20	463,82	467,44	507,02	429,79	306,23	115,84
25	750,07	681,63	442,09	442,09	449,59	527,85	515,10	518,87	562,69	477,14	340,25	128,33
26	824,25	749,15	486,29	486,29	494,55	580,49	566,38	570,29	618,36	524,48	374,28	140,82
27	898,43	816,67	530,50	530,50	539,51	633,14	617,66	621,72	674,03	571,83	408,30	153,30
28	972,61	884,19	574,71	574,71	584,47	685,79	668,94	673,15	729,70	619,17	442,33	165,79
29	1046,79	951,71	618,92	618,92	629,43	738,43	720,22	724,57	785,37	666,52	476,35	178,28
30	1120,97	1019,23	663,13	663,13	674,39	791,08	771,50	776,00	841,04	713,86	510,38	190,77

Berdasarkan analisis menggunakan program SAP2000 v14, didapatkan momen maksimum dan gaya geser maksimum pada tiap pembebanan yang ditampilkan pada Tabel 5.12.

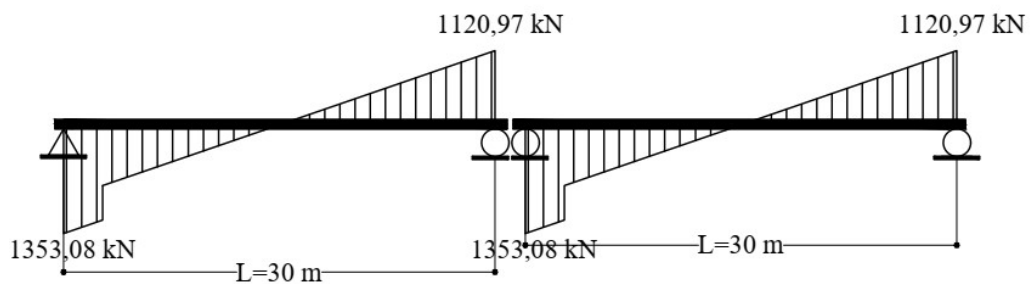
**Tabel 5. 12 Rekapitulasi Hasil Analisis Momen dan Gaya Geser Maksimum**

No	Jenis Beban		Momen	Gaya Geser
			M (kNm)	V (kN)
1	Beban balok	Mbs	1920,63	256,09
2	Beban pelat	Mpelat	1040,63	138,75
3	Beton cor ditempat	Mcor	1435,22	191,36
4	Berat sendiri	MS	3355,85	447,45
5	Beban mati tambahan	MA	330,92	44,12
6	Beban lajur "D"	TD	2824,95	372,43
7	Beban rem	TB	84,38	10,88
8	Beban angin	EWL	84,47	11,26
9	Temperatur seragam	EUn	117,56	15,68
10	Beban gempa	EQ	528,41	70,45

Kombinasi pembebanan berdasarkan SNI-1725-2016 (2016) menghasilkan momen dan gaya geser maksimum pada kombinasi pembebanan “Kuat I” yang digambarkan dalam bentuk diagram pada Gambar 5.25 dan Gambar 5.26.



**Gambar 5. 25 Diagram Momen akibat Kombinasi Pembebanan “Kuat I” pada Balok Sederhana**



**Gambar 5. 26 Diagram Gaya Geser akibat Kombinasi Pembebanan “Kuat I” pada Balok Sederhana**

### 5.4.2 Perhitungan Gaya Prategang, Eksentrisitas dan Jumlah Tendon

Pada sub bab ini akan dijabarkan proses perhitungan gaya prategang, eksentrisitas dan jumlah tendon yang akan digunakan pada balok prategang.

#### 1. Gaya Prategang Awal dan Eksentrisitas Tendon

Besarnya gaya prategang dihitung berdasarkan tegangan ijin beton pada kondisi transfer yaitu saat beton mencapai 80% kuat tekan. Penampang balok saat transfer adalah penampang *PCI* karena transfer gaya prategang dilakukan sebelum pengecoran *slab*.

Tegangan ijin beton pada kondisi awal berdasarkan RSNIT-12-2004 adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan ijin tekan, } f_{ci} = 0,6 \cdot f'_{ci} = 19,92 \text{ MPa} = 19920 \text{ kPa}$$

$$\text{Tegangan ijin tarik, } f_{ti} = 0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} = 1,44 \text{ MPa} = 1440 \text{ kPa}$$

$$\text{Jarak titik berat balok ke alas, } y_b = 0,8166 \text{ m}$$

$$\text{Modulus penampang atas, } S_a = 0,2676 \text{ m}^3$$

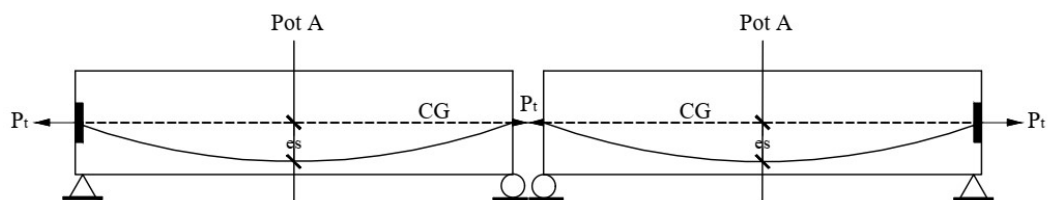
$$\text{Modulus penampang bawah, } S_b = 0,2895 \text{ m}^3$$

$$\text{Luas penampang, } A = 0,6695 \text{ m}^2$$

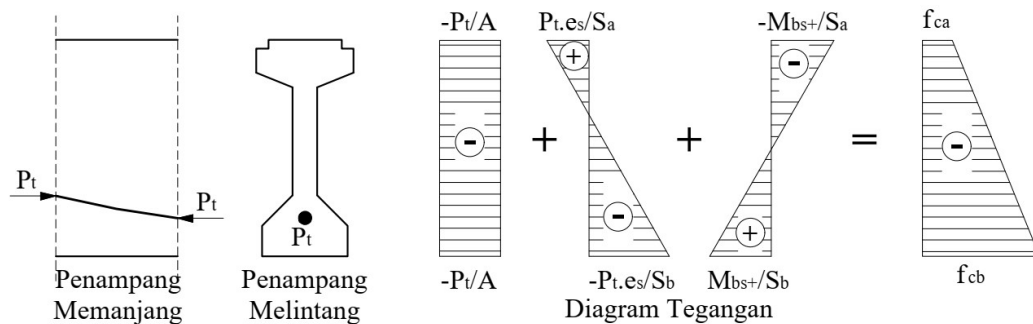
$$\text{Jarak titik berat tendon ke alas, } Z_0 = 0,15 \text{ m}$$

$$\text{Momen akibat berat sendiri balok, } M_{bs} = 1920,6281 \text{ kNm}$$

Sketsa lintasan tendon dan diagram tegangan pada saat transfer dapat dilihat pada Gambar 5.27 dan Gambar 5.28.



**Gambar 5. 27 Sketsa Lintasan Tendon Balok Sederhana dengan Keterangan Potongan**



**Gambar 5. 28 Diagram Tegangan pada saat Transfer (Pot A pada Gambar 5.27)**

Eksentrisitas tendon,

$$\begin{aligned} e_s &= y_b - Z_0 \\ &= 0,8166 - 0,15 \\ &= 0,6666 \text{ m} \end{aligned}$$

Gaya prategang dihitung dengan menggunakan persamaan tegangan beton pada sisi atas dan sisi bawah seperti yang digambarkan pada Gambar 5.28. Dari perhitungan di kedua sisi balok, diambil gaya prategang terkecil.

Tegangan pada serat atas

$$\begin{aligned} -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \cdot e_s}{S_a} - \frac{M_{bs}}{S_a} &= 0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} \\ -\frac{P_t}{0,6695} + \frac{P_t \cdot 0,6666}{0,2676} - \frac{1920,6281}{0,2676} &= 1440 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$P_t = 8641,2846 \text{ kN}$$

Tegangan pada serat bawah

$$\begin{aligned} -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{bs}}{S_b} &= 0,6 \cdot f'_{ci} \\ -\frac{P_t}{0,6695} - \frac{P_t \cdot 0,6666}{0,2895} + \frac{1920,6281}{0,2895} &= 19920 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$P_t = 6995,0183 \text{ kN}$$

Dari kedua hasil perhitungan tegangan pada sisi atas dan sisi bawah gelagar, diambil nilai terkecil.

$$P_t = 6995,0183 \text{ kN}$$

## 2. Jumlah Tendon dan Jumlah *Strands*

Jumlah tendon dan jumlah *strands* dihitung berdasarkan spesifikasi *strands* yang digunakan. Spesifikasi *strands* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.13.

**Tabel 5.13 Data *Strands* Cable**

DATA STRANDS CABLE - STANDAR VSL				
Jenis <i>strands</i>	ASTM A-416 grade 270			
Tegangan leleh <i>strand</i>	$f_{py}$	1675	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>	$A_{st}$	98,7	mm <sup>2</sup>	
Beban putus minimal satu <i>strands</i>	$P_{bs}$	183,7	kN	
Jumlah kawat untai ( <i>strands cable</i> )		14	kawat untai/tendon	
Diameter selubung	$d_t$	100	mm	
Luas tampang tendon	$A_{ps}$	1381,94	mm <sup>2</sup>	
Beban putus satu tendon	$P_{bl}$	2571,8	kN	
Modulus elastis <i>strands</i>	$E_s$	193000	MPa	

(Sumber : vsl.com, 13 Maret 2018)

Data data yang diperlukan dalam perhitungan jumlah tendon dan *strands* adalah sebagai berikut.

Gaya prategang awal,  $P_t = 6995,0183$  kN

Beban putus satu tendon,  $P_{bl} = 2571,8$  kN

Beban putus minimal satu *strands*,  $P_{bs} = 183,7$  kN

Jumlah tendon dan *strands* dihitung berdasarkan gaya prategang pada saat *jacking*. Gaya prategang saat *jacking* dihitung dengan persamaan berikut.

$$P_j = 0,85 \cdot P_{bl} \cdot n_t, \text{ maka } n_t = \frac{P_j}{0,85 \cdot P_{bl}}, \text{ dengan } P_j = \frac{P_t}{0,85}.$$

Maka jumlah tendon yang diperlukan adalah,

$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,85 \cdot P_{bl}} = \frac{6995,0183}{0,85 \cdot 0,85 \cdot 2571,8} = 3,76 \approx 4 \text{ tendon}$$

Jumlah *strands* yang diperlukan

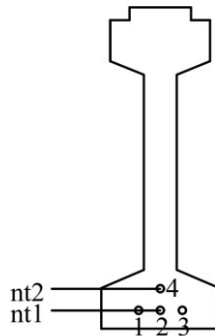
$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,85 \cdot P_{bs}} = \frac{6995,0183}{0,85 \cdot 0,85 \cdot 183,7} = 52,7 \approx 56 \text{ strands}$$

Tendon pada tengah bentang disusun seperti yang ditampilkan Tabel 5.14.

**Tabel 5. 14 Jumlah Strand dan Posisi Tendon di Tengah Bentang**

Tendon baris ke-1	$nt1 =$	3	Tendon	14	$strands/tendon =$	42	$strands$
Tendon baris ke-2	$nt2 =$	1	Tendon	14	$strands/tendon =$	14	$strands$
	$nt =$	4	Tendon	Jumlah strands	$ns =$	56	$strands$

Susunan tendon berdasarkan Tabel 5.14 ditampilkan pada Gambar 5.29 berikut.

**Gambar 5. 29 Posisi Tendon pada Tengah Bentang**

Persentase tegangan leleh pada saat *jacking* :

$$P_0 = \frac{P_t}{0,85 \cdot n_s \cdot P_{bs}} = \frac{6995,0183}{0,85 \cdot 56 \cdot 183,7} = 80,00\% < 85\% \quad \text{OK}$$

Gaya prategang yang terjadi akibat *jacking* :

$$P_j = P_0 \cdot (n_s \cdot P_{bs}) = 80,00\% \cdot (56 \cdot 183,7) = 8229,4334 \text{ kN}$$

Gaya prategang efektif,

Diperkirakan kehilangan gaya prategang = 31 %

$$P_{eff} = (100\% - 31\%) \cdot P_j = 69\% \cdot 8229,4334 = 5760,6033 \text{ kN}$$

Luas baja prategang yang dipakai,

$$A_p = n_s \cdot A_{st} = 56 \cdot 98,7 = 5527,76 \text{ mm}^2$$

Tegangan baja prategang saat *jacking*,

$$f_{pj} = \frac{P_j}{A_{ps}} = \frac{8229,4334 \cdot 1000}{5527,76} = 1488,7465 \text{ MPa}$$

Berdasarkan RSNIT-12-2004 pasal 4.4.3.2.2 tegangan ijin tarik baja prategang pada kondisi transfer tidak boleh melebihi nilai berikut.

$$f_{pj} = 1488,7465 \text{ MPa} < 0,94 \cdot f_{py} = 0,94 \cdot 1675 = 1574,5 \text{ MPa}$$

$$f_{pj} = 1488,7465 \text{ MPa} < 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1860 = 1581 \text{ MPa}$$



Tegangan baja prategang pada saat transfer tidak melebihi tegangan ijin, maka baja prategang aman terhadap tegangan tarik pada saat *jacking*.

### 5.4.3 Tata Letak Tendon

Sebelum menentukan lintasan tendon, terlebih dahulu menentukan zona aman tendon untuk memastikan tendon berada pada posisi yang optimal.

#### 1. Zona Aman tendon

Zona aman tendon direncanakan dengan peninjauan momen pada tengah bentang, seperempat bentang, dan ujung bentang balok prategang. Persamaan momen pada tengah bentang dan seperempat bentang adalah sebagai berikut.

Tengah bentang

$$M = \frac{1}{8} \cdot Q \cdot L^2$$

$$M = \frac{1}{8} \cdot Q \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P \cdot L$$

Seperempat bentang

$$M = \frac{3}{32} \cdot Q \cdot L^2$$

$$M = \frac{3}{32} \cdot Q \cdot L^2 + \frac{1}{8} \cdot P \cdot L$$

Ujung balok (tumpuan)

$$M = 0$$

Hasil perhitungan momen pada setiap titik yang ditinjau dapat dilihat pada Tabel 5.15.

**Tabel 5. 15 Momen di Titik yang Ditinjau pada Balok**

Nama	Beban		Momen		
	$Q$ kN/m	$P$ kN	Tengah kNm	Seperempat kNm	Ujung kNm
Berat girder ( $bs$ )	17,0723		1920,6281	1440,4711	0
Berat sendiri ( $MS$ )	29,8298		3355,8469	2516,8852	0
B Mati tambahan ( $MA$ )	2,9415		330,9188	248,1891	0
Beban lalu lintas ( $TD$ )	16,6500	126,91	2824,9500	1880,7563	0
$M_0 = M_{bs} + 50\% \cdot M_{MA}$			2086,0875	1564,5656	0
$MT = M_{MS} + M_{MA} + M_{TD}$			6511,7156	4645,8305	0

Tendon pada balok prategang perlu ditempatkan pada posisi dimana tekanan yang terjadi pada balok tidak melebihi tekanan ijin saat transfer tetapi tetap dapat menahan beban yang direncanakan. Posisi dimana tendon dapat ditempatkan terletak di antara batas atas dan batas bawah tendon. Perhitungan batas atas dan batas bawah letak tendon adalah sebagai berikut.

a. Batas bawah letak tendon

Data yang diperlukan dalam proses perhitungan batas bawah letak tendon adalah sebagai berikut.

$$\text{Gaya prategang awal, } P_t = 6995,0183 \text{ kN}$$

$$\text{Luas penampang PCI, } A = 0,6695 \text{ m}^2$$

$$\text{Inersia PCI, } I = 0,2364 \text{ m}^4$$

$$\text{Titik berat PCI, } y_a = 0,8834 \text{ m}$$

$$y_b = 0,8166 \text{ m}$$

$$\text{Tegangan ijin tarik awal, } f_{ti} = 1440,4860 \text{ kPa}$$

Radius girasi

$$r^2 = \frac{I}{A} = \frac{0,2364}{0,6695} = 0,3531 \text{ m}^2$$

Batas *kern* bawah

$$k_b = \frac{r^2}{y_a} = \frac{0,3531}{0,8834} = 0,3997 \text{ m}$$

Perhitungan batas bawah pada tengah bentang adalah sebagai berikut

$$a_{min} = \frac{M_0}{P_t} = \frac{2086,0875}{6995,0183} = 0,2982 \text{ m}$$

$$e_b = a_{min} + k_b = 0,2982 + 0,3997 = 0,6979 \text{ m}$$

Pada desain gelagar ini, diijinkan tegangan tarik pada beton prategang, maka batas bawah dapat diperlebar. Pertambahan lebar dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$e'_b = \frac{f_{ti} \cdot k_b \cdot A}{P_t} = \frac{1440,4860 \cdot 0,3997 \cdot 0,6695}{6995,0183} = 0,0551 \text{ m}$$

$$e_{b \max} = e_b + e'_b = 0,6979 + 0,0551 = 0,7531 \text{ m}$$

Perhitungan batas bawah tendon pada bentang yang lain dilakukan dengan persamaan yang sama. Hasil perhitungan batas bawah tendon dapat dilihat pada Tabel 5.16

**Tabel 5. 16 Batas Bawah Tendon**

Bagian	Panjang ( m )	$M_0$ ( kNm )	Tidak terjadi tarik		Terjadi tarik	
			$a_{min}$ ( m )	$e_b$ ( m )	$e'_b$ ( m )	$e_{b\ max}$ ( m )
Tengah bentang	15	2086,0875	0,2982	0,6979	0,0551	0,7531
Seperempat bentang	7,5	1564,5656	0,2237	0,6234	0,0551	0,6785
ujung	0	0	0	0,3997	0,0551	0,4548

## b. Batas atas letak tendon

Data yang diperlukan dalam proses perhitungan batas bawah letak tendon adalah sebagai berikut.

$$\text{Gaya prategang efektif, } P_{eff} = 5760,6033 \text{ kN}$$

$$\text{Luas penampang komposit, } A_c = 0,9323 \text{ m}^2$$

$$\text{Inersia komposit, } I_c = 0,4198 \text{ m}^4$$

$$\text{Titik berat komposit, } y_{ac} = 0,8062 \text{ m}$$

$$y_{bc} = 1,0938 \text{ m}$$

$$\text{Tegangan ijin tarik akhir, } f_{ts} = 3221,0247 \text{ kPa}$$

Radius girasi

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = \frac{0,4198}{0,9323} = 0,4503 \text{ m}^2$$

Batas *kern* atas

$$k_t = \frac{r^2}{y_{bc}} = \frac{0,4503}{1,0938} = 0,4117 \text{ m}$$

Perhitungan batas atas pada tengah bentang adalah sebagai berikut

$$a_{max} = \frac{M_T}{P_{eff}} = \frac{6511,7156}{5760,6033} = 1,1304 \text{ m}$$

$$e_t = a_{max} - k_t = 1,1304 - 0,4117 = 0,7187 \text{ m}$$

Pada desain gelagar ini, diijinkan tegangan tarik pada beton prategang, maka batas bawah dapat diperlebar. Pertambahan lebar dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$e'_t = \frac{f_t \cdot K_t \cdot A_c}{P_{eff}} = \frac{3221,0247 \cdot 0,4117 \cdot 0,9323}{5760,6033} = 0,2146 \text{ m}$$

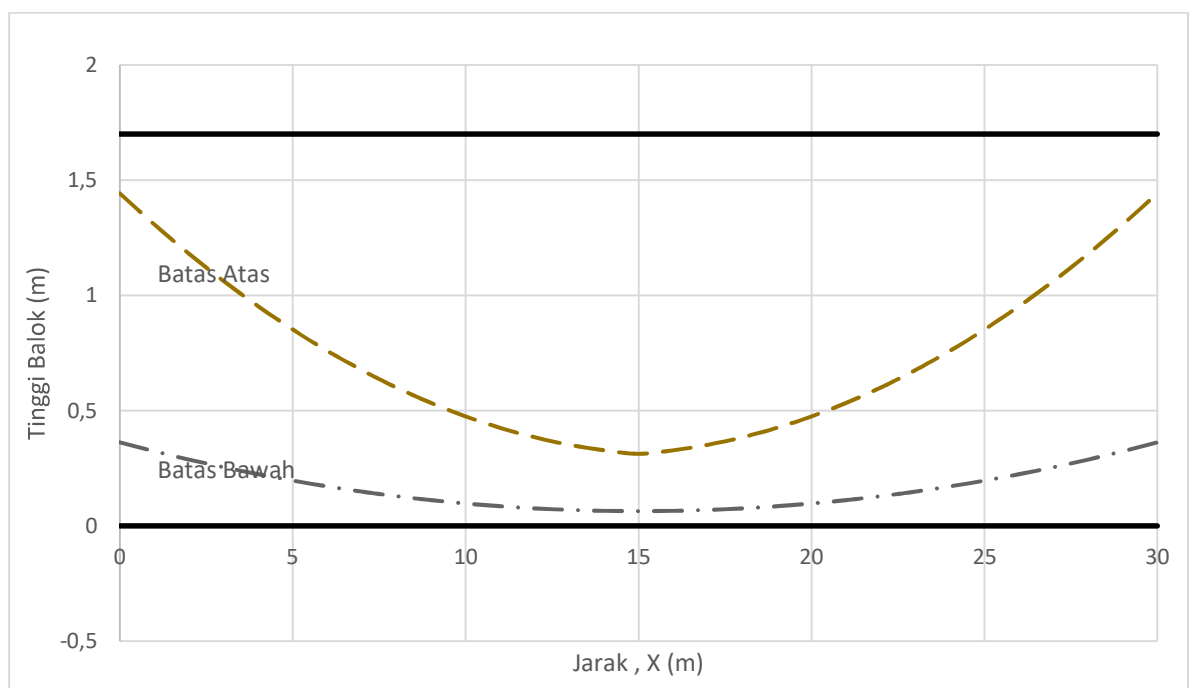
$$e_{t\ max} = e_t - e'_t = 0,7187 - 0,2146 = 0,5041 \text{ m}$$

Perhitungan batas atas tendon pada bentang yang lain dilakukan dengan persamaan yang sama. Hasil perhitungan batas atas tendon dapat dilihat pada Tabel 5.17.

**Tabel 5. 17 Batas Atas Tendon**

Bagian	Panjang ( m )	$MT$ ( kNm )	Tidak terjadi tarik		Terjadi tarik	
			$a_{max}$ ( m )	$e_t$ ( m )	$e_t'$ ( m )	$e_{t\ max}$ ( m )
Tengah bentang	15	6511,7156	1,1304	0,7187	0,2146	0,5041
Seperempat bentang	7,5	4645,8305	0,8065	0,3948	0,2146	0,1802
ujung	0	0	0	-0,4117	0,2146	-0,6263

Hasil perhitungan zona aman tendon yang ditampilkan pada Tabel 5.16 dan Tabel 5.17 digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.30.

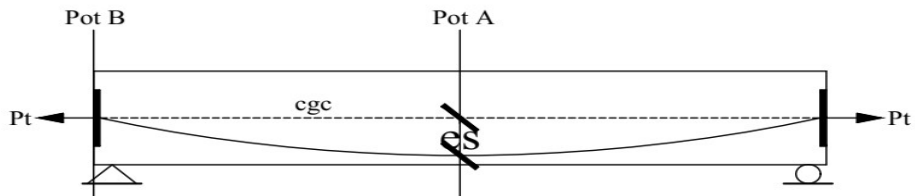


**Gambar 5. 30 Zona Aman Tendon**

Tendon harus ditempatkan di antara batas atas dan batas bawah seperti yang ditampilkan pada Gambar 5.30.

2. Tata Letak Posisi Tendon

Tata letak posisi tendon direncanakan berdasarkan peninjauan pada tengah bentang (Pot B) dan ujung balok pada tumpuan (Pot A) seperti yang terlihat pada Gambar 5.31.



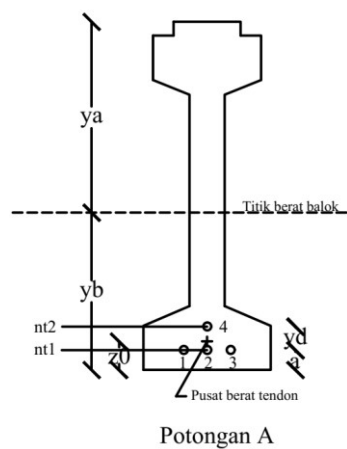
**Gambar 5. 31 Penampang Memanjang Balok Sederhana dengan Keterangan Potongan**

a. Posisi tendon di tengah bentang

Tengah bentang terletak di potongan A pada Gambar 5.31. Tendon di tengah bentang terdiri dari 2 baris tendon. Baris ke-1 terdiri dari 3 buah tendon yang masing-masing terdiri dari 14 *strands* dan baris ke-2 terdiri dari 1 buah tendon yang terdiri dari 14 *strands* seperti yang dapat dilihat pada Tabel 5.18 dan digambarkan pada Gambar 5.32.

**Tabel 5. 18 Jumlah *Strand* dan Posisi Tendon di Tengah Bentang**

Tendon baris ke-1	$nt1 =$	3	Tendon	14	$strands/tendon =$	42	<i>strands</i>
Tendon baris ke-2	$nt2 =$	1	Tendon	14	$strands/tendon =$	14	<i>strands</i>
	$nt =$	4	Tendon	Jumlah <i>strands</i>	$ns =$	56	<i>strands</i>



**Gambar 5. 32 Posisi Tendon di Tengah Bentang (Pot A pada Gambar 5.31)**

Ditetapkan jarak alas balok ke as baris tendon ke-1,  $a=0,1$  m.

Perhitungan selanjutnya adalah menentukan jarak vertikal antara tendon baris ke-1 dan ke-2 ( $y_d$ ), dimana data-data yang diperlukan dalam perhitungan adalah sebagai berikut.

Jarak titik berat tendon ke alas balok,	$Z_0$	=0,15 m
Jarak titik berat balok ke alas,	$y_b$	=0,8166 m
Eksentrisitas tendon,	$e_s$	=0,6666 m
Jumlah <i>strand</i> pada baris ke-1,	$n_{s1}$	=42 <i>strands</i>
Jumlah <i>strand</i> pada baris ke-2,	$n_{s2}$	=14 <i>strands</i>
Jumlah total <i>strand</i> ,	$n_s$	=56 <i>strands</i>
Diameter selubung tendon,	$d_t$	=0,1 m

Jarak vertikal antara as ke as tendon ( $y_d$ ) dihitung sebagai berikut.

$$n_s \cdot Z_0 = n_1 \cdot a + n_2 \cdot (a + y_d),$$

Dari persamaan di atas, maka  $y_d$  dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$y_d = \frac{n_s \cdot Z_0 - n_1 \cdot a}{n_2} - a = \frac{56 \cdot 0,15 - 42 \cdot 0,1}{14} - 0,1 = 0,2 \text{ m}$$

Syarat jarak bersih antar *ducting* dari VSL adalah sebagai berikut.

$$0,7 \cdot d_t = 0,7 \cdot 0,1 = 0,07 \text{ m}$$

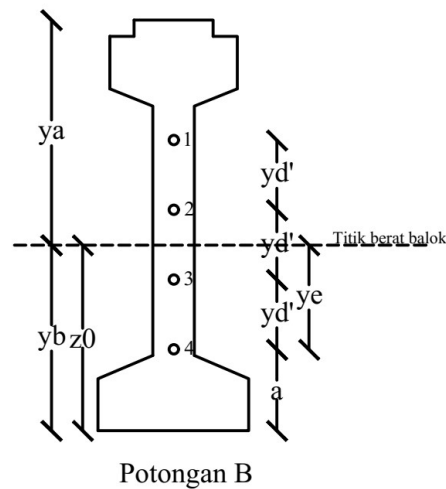
Jarak bersih antar selubung tendon,

$$y_d - d_t = 0,2 - 0,1 = 0,1 \text{ m}$$

$$0,1 \text{ m} > 0,07 \text{ m} \quad \text{OK}$$

#### b. Posisi tendon di tumpuan

Tumpuan terletak di potongan B pada Gambar 5.31. Posisi tendon di tumpuan terdiri dari 4 baris tendon yang disusun secara vertikal, dimana pusat berat tendon berada di titik berat *PCI-Girder*, seperti yang digambarkan pada Gambar 5.33.



**Gambar 5. 33 Posisi Tendon di Tumpuan (Pot B pada Gambar 5.31)**

Posisi masing-masing tendon pada tumpuan dihitung dengan langkah sebagai berikut.

Ditetapkan jarak tendon baris ke-4 terhadap alas,  $a'=0,35$  m.

Langkah selanjutnya adalah menentukan jarak antar as tendon ( $y'_d$ ) dengan cara menghitung momen statis tiap tiap tendon. Momen statis dihitung dengan cara mengalikan jumlah *strands* tiap tendon dengan jarak as tendon dengan as tendon terbawah. Perhitungan statis momen tendon ditampilkan pada Tabel 5.19.

**Tabel 5. 19 Statis Momen Tendon di Tumpuan**

Baris Tendon	$n_i$	Jumlah Strands	Jarak As Tendon dengan As Tendon Terbawah	Statis Momen
		$n_{si}$	$n_i \cdot y'_d$	$n_{si} \cdot y'_d$
1	0	14	0	0
2	1	14	1 $y'_d$	14 $y'_d$
3	2	14	2 $y'_d$	28 $y'_d$
4	3	14	3 $y'_d$	42 $y'_d$
$\Sigma(n_i \cdot y'_d) =$				84 $y'_d$

Jarak titik berat balok ke alas,  $y_b=0,8166$  m

$$y_e = y_b - a' = 0,8166 - 0,35 = 0,4666 \text{ m}$$

Untuk menghitung jarak antar as tendon ( $y'_d$ ), digunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\Sigma(n_i \cdot y_d') &= n_s \cdot y_e \\ 84 \cdot y_d' &= 56 \cdot 0,4666 \\ y_d' &= \frac{56 \cdot 0,4666}{84} \\ y_d' &= 0,3111 \text{ m}\end{aligned}$$

Syarat jarak bersih antar *ducting* dari VSL adalah sebagai berikut.

$$0,7 \cdot d_t = 0,7 \cdot 0,1 = 0,07 \text{ m}$$

Jarak bersih antar selubung tendon,

$$y_d - d_t = 0,3111 - 0,1 = 0,2111 \text{ m}$$

$$0,2111 \text{ m} > 0,07 \text{ m} \quad \text{OK}$$

c. Eksentrisitas masing-masing tendon

Eksentrisitas tendon dalam perhitungan posisi tendon merupakan jarak vertikal tendon di tumpuan dan di lapangan. Untuk menghitung eksentrisitas masing-masing tendon terlebih dahulu menentukan letak masing-masing tendon di tumpuan dan di lapangan. Detail perhitungan eksentrisitas masing-masing tendon adalah sebagai berikut.

1) Posisi Tendon di Tumpuan dengan posisi tendon  $X=0$

Pada tumpuan jarak dari alas ke baris tendon ke-4 adalah,  $a'=0,35 \text{ m}$ .

$$\text{Baris 1} : Z_1' = a' + 3 \cdot y_d' = 0,35 + 3 \cdot 0,3111 = 1,2832 \text{ m}$$

$$\text{Baris 2} : Z_2' = a' + 2 \cdot y_d' = 0,35 + 2 \cdot 0,3111 = 0,9721 \text{ m}$$

$$\text{Baris 3} : Z_3' = a' + 1 \cdot y_d' = 0,35 + 1 \cdot 0,3111 = 0,6611 \text{ m}$$

$$\text{Baris 4} : Z_4' = a' + 0 \cdot y_d' = 0,35 + 0 \cdot 0,3111 = 0,35 \text{ m}$$

2) Posisi Tendon di Lapangan dengan posisi tendon  $X=15$

Pada daerah lapangan, jarak dari alas ke baris tendon paling bawah adalah,  $a=0,1 \text{ m}$ .

$$\text{Tendon 1} : Z_1 = a + y_d = 0,1 + 0,2 = 0,3 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 2} : Z_2 = a = 0,1 = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 3} : Z_3 = a = 0,1 = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 4} : Z_4 = a = 0,1 = 0,1 \text{ m}$$



## 3) Eksentrisitas tiap tendon

Perhitungan eksentrisitas tiap tendon adalah sebagai berikut.

$$\text{Tendon 1 : } Z_1' - Z_1 = 1,2832 - 0,3 = 0,9832 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 2 : } Z_2' - Z_2 = 0,9721 - 0,1 = 0,8721 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 3 : } Z_3' - Z_3 = 0,6611 - 0,1 = 0,5611 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 4 : } Z_4' - Z_4 = 0,35 - 0,1 = 0,25 \text{ m}$$

## d. Lintasan inti tendon

Lintasan inti tendon dihitung dengan persamaan berikut.

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

$$\text{Panjang bentang balok, } L = 30 \text{ m,}$$

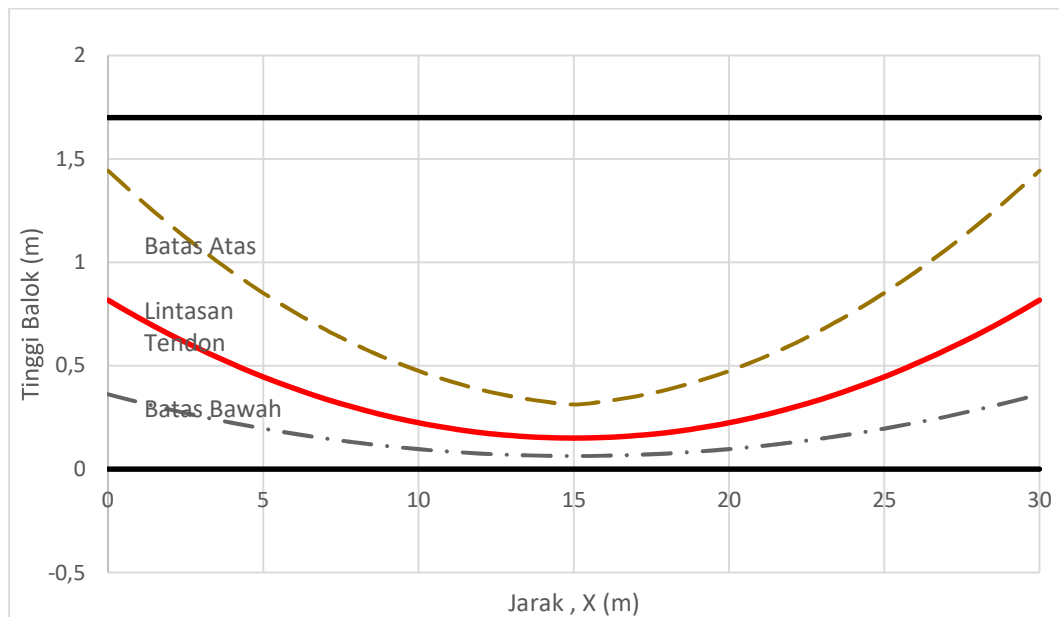
$$\text{eksentrisitas tendon, } f = e_s = 0,6666 \text{ m,}$$

dengan X adalah jarak titik yang ditinjau ke tumpuan.

Hasil perhitungan lintasan tendon dapat dilihat pada Tabel 5.20 dan digambarkan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 5.34.

**Tabel 5. 20 Lintasan Inti Tendon**

Jarak	Eksentrisitas Tendon	Jarak	Eksentrisitas Tendon	Jarak	Eksentrisitas Tendon
$X$	$Y$	$X$	$Y$	$X$	$Y$
( m )	( m )	( m )	( m )	( m )	( m )
0	0,0000				
1	0,0859	11	0,6192	21	0,5599
2	0,1659	12	0,6399	22	0,5214
3	0,2400	13	0,6547	23	0,4770
4	0,3081	14	0,6636	24	0,4266
5	0,3703	15	0,6666	25	0,3703
6	0,4266	16	0,6636	26	0,3081
7	0,4770	17	0,6547	27	0,2400
8	0,5214	18	0,6399	28	0,1659
9	0,5599	19	0,6192	29	0,0859
10	0,5925	20	0,5925	30	0,0000



**Gambar 5. 34 Zona Aman Tendon dan Lintasan Tendon**

Berdasarkan Gambar 5.34, tendon berada di antara batas atas dan batas bawah zona aman tendon, maka penempatan tendon pada balok prategang menerus sudah tepat.

e. Lintasan masing-masing tendon

Berikut ini adalah data-data yang diperlukan dalam perhitungan lintasan masing-masing tendon.

Panjang bentang jembatan,  $L = 30$  m

Titik berat balok terhadap alas,  $y_b = 0,8166$  m

Eksentrisitas inti tendon,  $e_s = f_0 = 0,6666$  m

Berdasarkan perhitungan sebelumnya, diperoleh posisi tiap tendon dan eksentrisitas masing-masing tendon yang dapat dilihat pada Tabel 5.21.

**Tabel 5. 21 Posisi tiap Tendon dan Eksentrisitas Masing-Masing Tendon**

No Tendon	Posisi tendon di tumpuan	Posisi Tendon di Tengah Bentang	Eksentrisitas Masing-Masing Tendon
	$Z_i'$	$Z_i$	$f_i$
	(m)	(m)	(m)
1	1,2832	0,3	0,9832
2	0,9721	0,1	0,8721
3	0,6611	0,1	0,5611
4	0,3500	0,1	0,2500

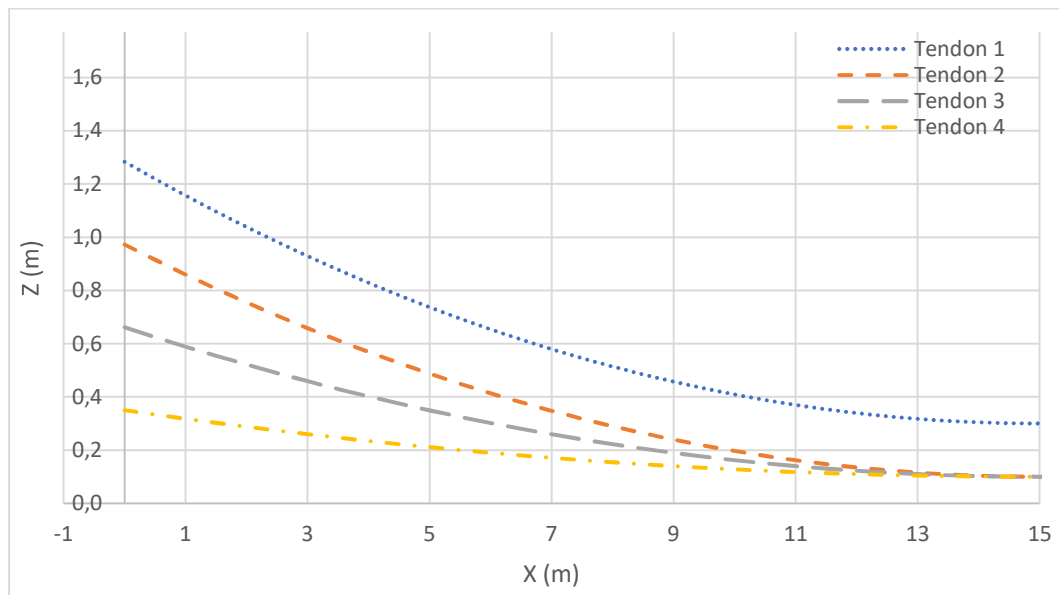
Persamaan lintasan tendon yang digunakan adalah sebagai berikut.

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

Lintasan masing-masing tendon dihitung dengan persamaan tersebut dengan data sesuai dengan Tabel 5.21. Hasil perhitungan numerik lintasan masing-masing tendon dapat dilihat pada Tabel 5.22 dan ditampilkan secara grafis pada Gambar 5.35.

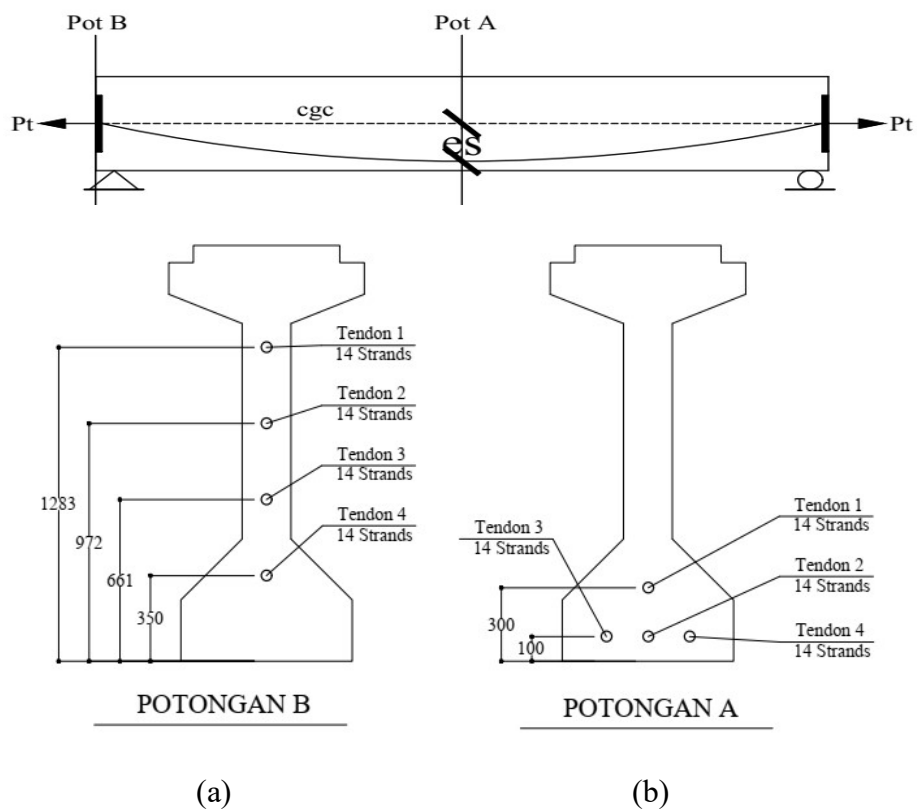
**Tabel 5. 22 Lintasan Masing-Masing Tendon**

Jarak	Inti Tendon	Lintasan Masing-Masing Tendon			
		Tendon 1	Tendon 2	Tendon 3	Tendon 4
$X$	$Z$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0	0,8166	1,2832	0,9721	0,6611	0,3500
1	0,7307	1,1565	0,8597	0,5887	0,3178
2	0,6507	1,0385	0,7551	0,5214	0,2878
3	0,5766	0,9292	0,6582	0,4591	0,2600
4	0,5085	0,8287	0,5690	0,4017	0,2344
5	0,4463	0,7370	0,4876	0,3494	0,2111
6	0,3900	0,6539	0,4140	0,3020	0,1900
7	0,3396	0,5797	0,3481	0,2596	0,1711
8	0,2952	0,5141	0,2899	0,2222	0,1544
9	0,2567	0,4573	0,2395	0,1898	0,1400
10	0,2241	0,4092	0,1969	0,1623	0,1278
11	0,1974	0,3699	0,1620	0,1399	0,1178
12	0,1767	0,3393	0,1349	0,1224	0,1100
13	0,1619	0,3175	0,1155	0,1100	0,1044
14	0,1530	0,3044	0,1039	0,1025	0,1011
15	0,1500	0,3000	0,1000	0,1000	0,1000



**Gambar 5. 35 Grafik Lintasan Tendon**

Gambar penampang melintang *PCI-Girder* dengan detail posisi tendon pada tumpuan dan lapangan dapat dilihat pada Gambar 5.36.



**Gambar 5. 36 Posisi Tendon pada (a) Tumpuan dan (b) Tengah Bentang**

#### 5.4.4 Kehilangan Gaya Prategang (*Loss of Prestress*)

Kehilangan gaya prategang (*Loss of Prestress*) dikelompokkan menjadi 2 yaitu kehilangan gaya prategang jangka pendek dan kehilangan gaya prategang jangka panjang.

##### 1. Kehilangan gaya prategang jangka pendek

Kehilangan gaya prategang jangka pendek terjadi pada saat proses transfer gaya prategang, dan terjadi pada waktu singkat. Kehilangan gaya prategang jangka pendek meliputi perpendekan elastis beton, dudukan angkur, dan friksi.

##### a. Kehilangan prategang karena dudukan angkur

Saat gaya prategang disalurkan ke angkur, angkur tertarik masuk berkisar antara 2-7mm.

$$\begin{aligned} \text{Pergeseran angkur} \quad \Delta_A &= 2 \text{ mm} \\ &= 0,002 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Modulus elastisitas baja prategang} \quad E_s = 193000 \text{ MPa}$$

$$\text{Panjang tendon} \quad L = 30 \text{ m}$$

Kehilangan prategang akibat pergeseran angkur dihitung dengan persamaan berikut.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} \cdot E_{ps} = \frac{0,002}{30} \cdot 193000 = 12,8667 \text{ MPa}$$

##### b. Kehilangan tegangan akibat friksi/gesekan tendon

Metode penarikan baja prategang yang digunakan adalah pascatarik dengan penarikan dilakukan pada dua sisi gelagar. Data yang diperlukan dalam perhitungan kehilangan tegangan akibat gesekan tendon adalah sebagai berikut.

$$\text{Eksentrisitas tendon,} \quad e_s = y = 0,6666 \text{ m}$$

$$\text{Panjang tendon prategang,} \quad L = x = 30 \text{ m}$$

$$\text{Tegangan baja prategang saat } jacking, f_1 = f_{pj} = 1488,7465 \text{ MPa}$$

$$\text{Koefisien } Wobble, \quad K = 0,002$$

$$\text{Koefisien kelengkungan,} \quad \mu = 0,2$$

Sudut tendon,

$$\alpha = \frac{\delta y}{x} = \frac{8 \cdot 0,6666}{30} = 0,1778 \text{ radian}$$

Kehilangan tegangan akibat gesekan tendon dihitung dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \Delta f_{pF} &= f_1 (1 - e^{-\mu\alpha \cdot KL}) \\ &= 1488,7465 \cdot (1 - e^{-0,2 \cdot 0,1778 \cdot 0,002 \cdot 30}) \\ &= 135,6673 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c. Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton

Transfer gaya prategang dilakukan dalam 2 tahap, dimana dalam satu tahap transfer, dua tendon ditarik secara bersamaan. Data yang diperlukan dalam perhitungan ini adalah sebagai berikut,

Luas penampang PCI,  $A = 0,6695 \text{ m}^2$

Eksentrisitas tendon,  $e_s = 0,6666 \text{ m}$

Momen inersia tampang *PCI-Girder*,  $I = 0,2364 \text{ m}^4$

Berat jenis beton prategang,  $w_c = 25,5 \text{ kN/m}^3$

Kuat tekan beton prategang,  $f'_c = 41,5 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas beton prategang pada saat transfer.

Kuat tekan beton prategang saat transfer,  $f'_{ci} = 33,2 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned} E_{ci} &= 0,043 \cdot W_c^{1,5} \cdot \sqrt{f'_{ci}} \\ &= 0,043 \cdot 25,5^{1,5} \cdot \sqrt{33,2} \\ &= 31904,1933 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Modulus elastisitas baja prategang,  $E_s = 193000 \text{ MPa}$

Jumlah total *strands*,  $n_s = 56 \text{ strands}$

Luas tampang tendon prategang,  $A_{ps} = 5527,76 \text{ mm}^2$

Momen akibat berat sendiri PCI,  $M_{bs} = 1920,6281 \text{ kNm}$

Rasio modulus antara baja prategang dengan *PCI-Girder*,

$$n = \frac{E_s}{E_{ci}} = \frac{193000}{31904,1933} = 6,0494$$

Tegangan baja prategang setelah dikurangi kehilangan tegangan akibat pengangkutan dan gesekan adalah sebagai berikut

$$\begin{aligned} f_{pi} &= f_{pj} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pF} \\ &= 1488,7465 - 12,8667 - 135,6673 \\ &= 1340,2126 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Gaya prategang setelah kehilangan gaya prategang akibat pengangkutan dan gesekan.

$$\begin{aligned} P_i &= f_{pi} \cdot A_{ps} \\ &= 1340,2126 \cdot 5527,76 \cdot 10^{-3} \\ &= 7408,3735 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tegangan beton di pusat berat tendon saat transfer,

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_x} + \frac{M_{bs} \cdot e_s}{I_x} \\ &= -\frac{7408,3735}{0,6695} - \frac{7408,3735 \cdot 0,6666^2}{0,2364} + \frac{2041,1156 \cdot 0,6666}{0,2364} \\ &= 19574,4368 \text{ kPa} = 19,5744 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis,

$$\begin{aligned} \Delta f_{pE} &= n \cdot f_{cs} \\ &= 6,0494 \cdot 19,5744 \\ &= 118,4128 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Gelagar pada Jembatan Sambiroto menggunakan 4 buah tendon yang ditarik dalam 2 tahap, dengan 2 tendon di tarik sekaligus. Maka kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis beton adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \Delta f_{pES} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j \\ &= \frac{1/1}{2} \cdot 118,4128 \\ &= 59,2064 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan baja prategang setelah transfer.

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_{pj} - (\Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES}) \\ &= 1488,7465 - (12,8667 + 135,6673 + 59,2064) \\ &= 1281,0062 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Gaya prategang setelah transfer,

$$\begin{aligned} P_t &= A_{ps} \cdot f_{ps} \\ &= 5527,76 \cdot 1281,0062 \cdot 10^{-3} \\ &= 7081,0946 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 2. Kehilangan Gaya Prategang Jangka Panjang

Kehilangan gaya prategang jangka Panjang terjadi akibat rangkak, susut dan relaksasi tendon. Kehilangan gaya prategang jangka Panjang dihitung sebagai berikut.

### a. Kehilangan tegangan akibat pengaruh rangkak (*creep*)

Nilai  $K_{CR}$  ditentukan dari sistem penarikan baja prategang yang digunakan. Pada Jembatan Sambiroto, sistem penarikan baja prategang menggunakan sistem pascatarik sehingga nilai  $K_{CR}$  adalah sebagai berikut.

$$K_{CR} = 1,6$$

Modulus elastisitas tendon,  $E_s = 193000 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas beton prategang,  $E_c = 35669,973 \text{ MPa}$

Gaya prategang setelah transfer,  $P_t = 7081,0946 \text{ MPa}$

Luas penampang PCI,  $A_c = 0,9323 \text{ m}^2$

Momen inersia PCI,  $I_c = 0,4198 \text{ m}^4$

Eksentrisitas tendon balok komposit,  $e = 0,9438 \text{ m}$

Momen akibat berat sendiri PCI,  $M_{bs} = 1920,6281 \text{ kNm}$

Rasio modulus antara baja prategang dengan *PCI-Girder*,

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{193000}{35669,973} = 5,41$$

Tegangan beton di pusat berat tendon,

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P_t}{A_c} - \frac{P_t \cdot e_s^2}{I_c} + \frac{M_{bs} \cdot e_s}{I_c} \\ &= -\frac{7081,0946}{0,9323} - \frac{7081,0946 \cdot 0,9438^2}{0,4198} + \frac{1920,6281 \cdot 0,9438}{0,4198} \\ &= -18302,47 \text{ kPa} = -18,3025 \text{ MPa} \end{aligned}$$



Momen akibat beban mati tambahan,  $M_{MA}=330,9188$  kNm

Tegangan beton di pusat berat tendon akibat beban mati tambahan,

$$\begin{aligned} f_{csd} &= \frac{M_{MA} \cdot e_s}{I_c} \\ &= \frac{330,9188 \cdot 0,9438}{0,4198} \\ &= 743,9894 \text{ kPa} = 0,7440 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kehilangan tegangan akibat pengaruh rangkaiak dihitung dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \Delta f_{pCR} &= n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \\ &= 5,41 \cdot 1,6 \cdot (18,3025 - 0,7440) \\ &= 152,0063 \text{ MPa} \end{aligned}$$

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

Metode perawatan yang digunakan adalah perawatan basah 7 hari.

$$t = 30 \text{ hari}$$

$$E_{ps} = 193000 \text{ MPa}$$

Regangan susut ultimit,  $(\epsilon_{SH})_u = 0,00082$

Regangan susut dengan perawatan basah,

$$\begin{aligned} (\epsilon_{SH})_t &= \frac{t}{35+t} \cdot (\epsilon_{SH})_u \\ &= \frac{30}{35+30} \cdot 0,00082 \\ &= 0,000378 \end{aligned}$$

Kehilangan gaya prategang akibat susut dihitung dengan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \Delta f_{pSH} &= (\epsilon_{SH})_t \cdot E_s \\ &= 0,000378 \cdot 193000 \\ &= 73,0431 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c. Kehilangan tegangan akibat relaksasi tendon (*relaxation of tendon*)

Berikut ini adalah perhitungan tegangan tarik akibat relaksasi tendon.

Tegangan leleh tendon,  $f_{py} = 1675$  MPa

Tegangan baja prategang setelah transfer,  $f_{ps} = 1281,0062$  MPa

Jembatan direncanakan untuk 50 tahun.

50 tahun = 18250 hari = 438000 jam

Tendon menggunakan *low relaxation tendon*, maka kehilangan tegangan akibat relaksasi beton adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta f_{pR} &= f_{ps} \cdot \frac{\log t}{45} \cdot \left( \frac{f_{ps}}{f_{py}} - 0.55 \right) \\ &= 1281,0062 \cdot \frac{\log(438000)}{45} \cdot \left( \frac{1281,0062}{1675} - 0.55 \right) \\ &= 34,4925 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Rekapitulasi kehilangan gaya prategang dapat dilihat pada Tabel 5.23.

**Tabel 5. 23 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang**

No.	Level Tegangan	Tegangan Baja	Persentase
		( MPa )	( % )
	Setelah Penegangan	1488,7465	100%
	Kehilangan Prategang		
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	12,8667	0,86%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	135,6673	9,11%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	59,2064	3,98%
	<i>f<sub>ps</sub></i> =	1281,0062	86,05%
4	Rangak beton ( <i>creep</i> )	152,0063	10,21%
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	73,0431	4,91%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	34,4925	2,32%
	Tegangan Akhir ( <i>f<sub>pe</sub></i> )	1021,4643	68,61%
	Kehilangan Tegangan Total ( <i>loss of prestress</i> )	467,2822	31,39

Tegangan prategang efektif adalah sebagai berikut.

$$f_{eff} = 1021,4643 \text{ MPa}$$

Gaya prategang efektif adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}P_{eff} &= A_{ps} \cdot f_{eff} \\ &= 5527,76 \cdot 1021,4643 \cdot 10^{-3} \\ &= 5646,4069 \text{ kN}\end{aligned}$$

#### 5.4.5 Tegangan yang Terjadi pada Penampang Balok

Pada desain gelagar prategang ini, tidak diijinkan adanya retak pada beton. Maka tegangan tarik dan desak pada beton dibatasi sesuai dengan tegangan ijin sesuai dengan RSNIT-12-2004. Tegangan ijin beton pada kondisi transfer adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan tekan } f_{ci} = 0,6f'_{ci} = 0,6 \cdot 33,2 = 19,92 \text{ MPa}$$

$$\text{Tegangan tarik } f_{ti} = 0,25\sqrt{f'_{ci}} = 0,25\sqrt{33,2} = 1,44 \text{ MPa}$$

Tegangan ijin beton pada kondisi batas layan (setelah memperhitungkan seluruh kehilangan tegangan) adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan tekan } f_c = 0,45f'_c = 0,45 \cdot 41,5 = 18,675 \text{ MPa}$$

$$\text{Tegangan tarik } f_t = 0,5\sqrt{f'_c} = 0,25\sqrt{51,5} = 3,22 \text{ MPa}$$

Berdasarkan tahap pembebanan, beton prategang dibagi menjadi 3 kondisi yaitu kondisi awal, kondisi saat pelat lantai selesai dicor dan kondisi layan. Tegangan yang terjadi pada ketiga kondisi tersebut tidak boleh melebihi tegangan ijin. Perhitungan tegangan pada ketiga kondisi tersebut adalah sebagai berikut.

##### 1. Tegangan Beton pada Tahap Pembebanan

Tegangan beton pada tahap pembebanan dibedakan menjadi 3 yaitu kondisi awal (saat transfer), kondisi setelah pelat lantai selesai dicor (beton muda), dan kondisi setelah pelat dan balok menjadi komposit

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

Saat transfer *section properties* yang digunakan adalah *section properties I-Girder* karena gelagar diberi pelat lantai jembatan. Berikut ini adalah data data untuk perhitungan tegangan beton pada keadaan awal.

$$\text{Gaya prategang awal, } P_t = 6995,0183 \text{ kN}$$

$$\text{Momen akibat berat sendiri balok, } M_{bs} = 1920,6281 \text{ kNm}$$

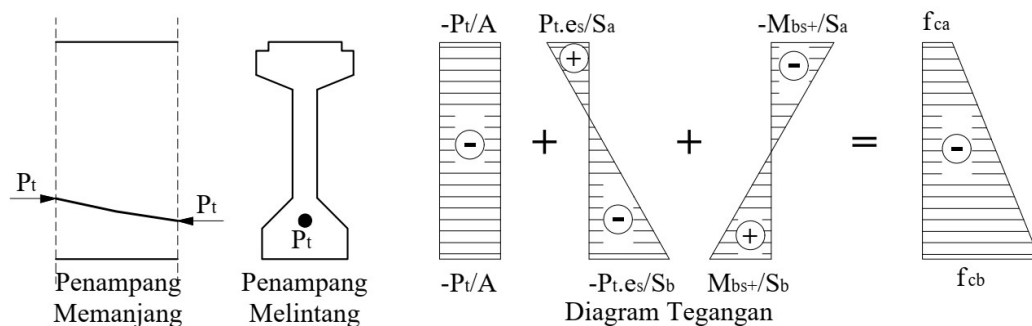
$$\text{Luas penampang PCI, } A = 0,6695 \text{ m}^2$$

$$\text{Eksentrisitas tendon, } e_s = 0,6666 \text{ m}$$

$$\text{Modulus penampang atas, } S_a = 0,2676 \text{ m}^3$$

$$\text{Modulus penampang bawah, } S_b = 0,2895 \text{ m}^3$$

Tegangan yang terjadi dihitung pada sisi atas dan sisi bawah balok seperti pada Gambar 5.37.



**Gambar 5. 37 Diagram Tegangan pada Saat Transfer**

Tegangan di serat atas

$$\begin{aligned}
 f_{ca} &= -\frac{P_t}{A_n} + \frac{P_t \cdot e_s}{S_a} - \frac{M_{bs}}{S_a} \\
 &= -\frac{6995,0183}{0,6695} + \frac{6995,0183 \cdot 0,6666}{0,2676} - \frac{1920,6281}{0,2676} \\
 &= -201,2283 \text{ kPa} = -0,2012 \text{ MPa} < 19,92 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

Tegangan di serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_{cb} &= -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{bs}}{S_b} \\
 &= -\frac{6995,0183}{0,6695} - \frac{6995,0183 \cdot 0,6666}{0,2895} + \frac{1920,6281}{0,2895} \\
 &= -19920 \text{ kPa} = -19,920 \text{ MPa} = 19,92 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

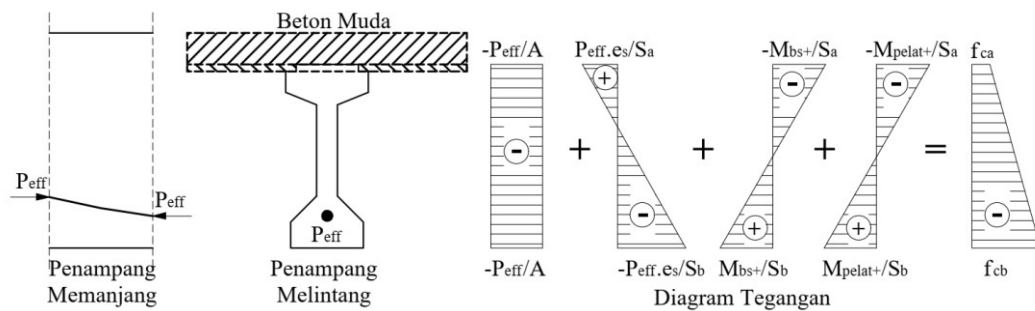
Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

b. Kondisi setelah pelat lantai selesai dicor (beton muda)

Setelah pelat lantai selesai dicor, *section properties* yang digunakan tetap menggunakan *section properties I-Girder* karena balok dan pelat belum menjadi satu kesatuan, tetapi balok sudah menahan beban akibat berat lantai jembatan.

Gaya prategang efektif,	$P_{eff} = 5646,4096 \text{ kN}$
Momen akibat berat sendiri balok,	$M_{bs} = 1920,6281 \text{ kNm}$
Momen akibat berat pelat,	$M_{pelat} = 1040,6250 \text{ kNm}$
Luas penampang PCI,	$A = 0,6695 \text{ m}^2$
Modulus penampang atas,	$S_a = 0,2676 \text{ m}^3$
Modulus penampang bawah,	$S_b = 0,2895 \text{ m}^3$
Eksentrisitas tendon,	$e_s = 0,6666 \text{ m}$

Perhitungan tegangan dilakukan pada sisi atas dan sisi bawah balok seperti yang digambarkan pada Gambar 5.38.



**Gambar 5. 38 Diagram Tegangan Setelah Pelat Lantai Selesai Dicor**

Tegangan di serat atas

$$\begin{aligned}
 f_a &= -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff}e_s}{S_a} - \frac{M_{bs}+M_{pelat}}{S_a} \\
 &= -\frac{5646,4096}{0,6666} + \frac{5646,4096 \cdot 0,6584}{0,2676} - \frac{1920,6281+1040,6250}{0,2676} \\
 &= -5434,6626 \text{ kPa} = -5,4347 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

Tegangan di serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_b &= -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff}e_s}{S_b} + \frac{M_{balok+pelat}}{S_b} \\
 &= -\frac{5646,4096}{0,6666} - \frac{5646,4096 \cdot 0,6584}{0,2895} + \frac{1920,6281+1040,6250}{0,2895} \\
 &= -11206,0434 \text{ kPa} = -11,2060 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

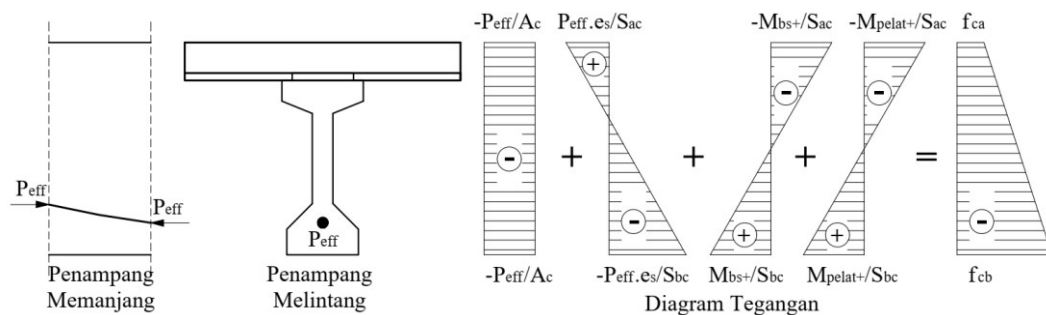
Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

c. Kondisi setelah pelat dan balok menjadi komposit

*Section properties* yang digunakan adalah *section properties* balok komposit karena balok dan pelat sudah menyatu menjadi satu kesatuan.

Gaya prategang efektif,	$P_{eff}$	=5646,4096 kN
Momen akibat berat sendiri balok,	$M_{bs}$	=1920,6281 kNm
Momen akibat berat pelat,	$M_{pelat}$	=1024,6250 kNm
Luas penampang balok komposit,	$A_c$	=0,9323 m <sup>2</sup>
Titik berat balok komposit terhadap alas,	$y_{bc}$	=1,0938 m
Titik berat tendon terhadap alas,	$Z_0$	=0,15 m
Modulus penampang atas pelat,	$S_{ac}$	=0,5207 m <sup>3</sup>
Modulus penampang atas balok,	$S'_{ac}$	=0,6924 m <sup>3</sup>
Modulus penampang sisi bawah balok,	$S_{bc}$	=0,3838 m <sup>3</sup>

Diagram tegangan pada sisi atas dan bawah balok pada balok komposit digambarkan pada Gambar 5.39.



**Gambar 5. 39 Diagram Tegangan Saat Balok dan Pelat Menjadi Komposit**

Eksentrisitas tendon,

$$e'_s = y_{bc} - Z_0 = 1,0938 - 0,15 = 0,9438 \text{ m}$$

Tegangan beton di serat atas pelat

$$\begin{aligned}
 f_{ac} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \cdot e'_s}{S_{ac}} - \frac{M_{balok+pelat}}{S_a} \\
 &= -\frac{5646,4096}{0,9323} + \frac{5646,4096 \cdot 0,9438}{0,5207} - \frac{1920,6281 + 1040,6250}{0,5207} \\
 &= -1509,3083 \text{ kPa} = -1,5093 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas pelat yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas pelat tidak retak.

Tegangan beton di serat atas balok

$$\begin{aligned} f'_{ac} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e'_s}{S'_{ac}} - \frac{M_{balok+pelat}}{S'_a} \\ &= -\frac{5646,4096}{0,9323} + \frac{5646,4096 \cdot 0,9438}{0,6924} - \frac{1920,6281 + 1040,6250}{0,6924} \\ &= -2637,3628 \text{ kPa} = -2,6374 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

Tegangan beton di serat bawah balok

$$\begin{aligned} f_{bc} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff}e'_s}{S_{bc}} + \frac{M_{balok+pelat}}{S_b} \\ &= -\frac{5646,4096}{0,9323} - \frac{5646,4096 \cdot 0,9438}{0,3838} + \frac{1920,6281 + 1040,6250}{0,3838} \\ &= -12225,8262 \text{ kPa} = -12,2226 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

## 2. Tegangan Beton Akibat Beban

Data yang digunakan dalam perhitungan tegangan akibat beban adalah sebagai berikut.

$$\text{Modulus penampang atas pelat, } S_{ac} = 0,5207 \text{ m}^3$$

$$\text{Modulus penampang atas balok, } S'_{ac} = 0,6924 \text{ m}^3$$

$$\text{Modulus penampang bawah balok, } S_{bc} = 0,3838 \text{ m}^3$$

### a. Berat sendiri

$$\text{Momen akibat berat sendiri, } M_{MS} = 3355,8469 \text{ kNm}$$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{MS}}{S_{ac}} = -\frac{3355,8469}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -6,4452 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{MS}}{S'_{ac}} = -\frac{3355,8469}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -4,8464 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{MS}}{S_{bc}} = \frac{3355,8469}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 8,7439 \text{ MPa}$$

## b. Beban mati tambahan

Momen akibat beban mati tambahan,  $M_{MA}=330,9188$  kNm

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{MA}}{S_{ac}} = -\frac{330,9188}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,6356 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{MA}}{S'_{ac}} = -\frac{330,9188}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,4779 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{MA}}{S_{bc}} = \frac{330,9188}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,8622 \text{ MPa}$$

## c. Susut dan rangkai

## 1) Susut

Luas penampang pelat,  $A_{pelat}=0,2628$  m<sup>2</sup>

$$k_b = 0,905$$

$$k_c = 3$$

$$k_d = 0,938$$

$$k_e = 0,734$$

$$k_m = 0,2$$

$$\varepsilon_b = 0,0006$$

$$\begin{aligned} \Delta_{esu} &= \varepsilon_b \cdot k_b \cdot k_e \\ &= 0,0006 \cdot 0,905 \cdot 0,734 \\ &= 0,000398 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_f &= k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot (1 - k_m) \\ &= 0,905 \cdot 3 \cdot 0,938 \cdot 0,734 \cdot (1 - 0,2) \\ &= 1,4954 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{sh} &= A_{pelat} \cdot E_{pelat} \cdot \Delta_{esu} \cdot n \cdot \frac{1 - e^{-c_f}}{c_f} \\ &= 0,2628 \cdot 25332084 \cdot 0,000398 \cdot 0,7102 \cdot \frac{1 - e^{-1,4954}}{1,4954} \\ &= 976,5296 \text{ kN} \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{Eksentrisitas gaya susut, } e &= y_{ac} - h_0/2 \\
 &= 0,8062 - 0,2/2 \\
 &= 0,7062 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{P_{sh}}{A_c} + \frac{P_{sh} \cdot e_s}{S_{ac}} = -\frac{976,5296}{0,9323} - \frac{976,5296 \cdot 0,7062}{0,5207} = -2,3720 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{P_{sh}}{A_c} + \frac{P_{sh} \cdot e_s}{S_{ac}} = -\frac{976,5296}{0,9323} - \frac{976,5296 \cdot 0,7062}{0,6924} = -2,0434 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{P_{sh}}{A_c} + \frac{P_{sh} \cdot e_s}{S_{ac}} = -\frac{976,5296}{0,9323} + \frac{976,5296 \cdot 0,7062}{0,3838} = 0,7495 \text{ MPa}$$

## 2) Rangkak

$$P_i = 7081,0946 \text{ kN}$$

$$P_{eff} = 5646,4096 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cr} = (1 - e^{-cf})(\sigma_2 - \sigma_1)$$

$\sigma_1$  = tegangan akibat berat sendiri dengan gaya prategang awal

$\sigma_2$  = tegangan akibat berat sendiri dengan gaya prategang efektif

$cf$  = residual creep factor

$$cf = k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot (1 - k_m)$$

$$= 0,905 \cdot 3 \cdot 0,938 \cdot 0,734 \cdot (1 - 0,2)$$

$$= 1,4954$$

$\sigma_1$  dihitung dengan persamaan berikut,

$$f = -\frac{P_t}{A_c} \pm \frac{P_t \cdot e_s}{S} \pm \frac{M_{balok+pelat}}{S}$$

$\sigma_2$  dihitung dengan persamaan berikut,

$$f = -\frac{P_{eff}}{A_c} \pm \frac{P_{eff} \cdot e_s}{S} \pm \frac{M_{balok+pelat}}{S}$$

Hasil perhitungan tegangan akibat rangkakan dapat dilihat pada Tabel 5.24.

**Tabel 5. 24 Tegangan Akibat Rangkak**

Letak	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2 - \sigma_1$ (MPa)	$(1-e^{-cf})$	$\sigma_{cr}$ (MPa)
$f_{ca}$	-1,5093	-0,4477	-1,0616	0,7758	-0,8236
$f'_{ca}$	-2,6374	-2,2209	-0,4165	0,7758	-0,3231
$f_{cb}$	-12,2258	-17,2928	-5,0669	0,7758	-3,9311

Setelah tegangan akibat rangkak dan susut diketahui, tegangan akibat susut dan rangkak dijumlahkan. Hasil perhitungan tegangan akibat susut dan rangkak dapat dilihat pada Tabel 5.25.

**Tabel 5. 25 Tegangan Akibat Susut dan Rangkak**

Letak	Susut	Rangkak	Susut dan Rangkak
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
$f_{ca}$	-2,3720	-0,8236	-3,1956
$f'_{ca}$	-2,0434	-0,3231	-2,3666
$f_{cb}$	0,7495	-3,9311	-3,1817

d. Prategang

Gaya prategang efektif,  $P_{eff} = 5646,4096 \text{ kN}$

Luas penampang balok komposit,  $A_c = 0,9323 \text{ m}^2$

Eksentrisitas tendon saat komposit,  $e_s = 0,9438$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5646,4096}{0,9323} + \frac{5646,4096 \cdot 0,9438}{0,5207} = 4,1781 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5646,4096}{0,9323} + \frac{5646,4096 \cdot 0,9438}{0,6924} = 1,6391 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5646,4096}{0,9323} - \frac{5646,4096 \cdot 0,9438}{0,3838} = -19,9416 \text{ MPa}$$

e. Beban lajur “D”

Momen akibat beban lajur “D”,  $M_{TD} = 2824,95 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{TD}}{S_{ac}} = -\frac{2824,95}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -5,4256 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f_{ac} = -\frac{M_{TD}}{S_{ac}} = -\frac{2824,95}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -4,0797 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{TD}}{S_{bc}} = \frac{2824,95}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 7,3606 \text{ MPa}$$

f. Gaya rem

Momen akibat gaya rem,  $M_{TB} = 84,3750 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{TB}}{S_{ac}} = -\frac{84,3750}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,1620 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f_{ac} = -\frac{M_{TB}}{S_{ac}} = -\frac{84,3750}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,1219 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{TB}}{S_{bc}} = \frac{84,3750}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,2198 \text{ MPa}$$

g. Beban angin kendaraan

Momen akibat beban angin kendaraan,  $M_{EWL} = 84,4714 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EWL}}{S_{ac}} = -\frac{84,4714}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,1622 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EWL}}{S_{ac}} = -\frac{84,4714}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,1220 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{EWL}}{S_{bc}} = \frac{84,4714}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,2201 \text{ MPa}$$

h. Temperatur seragam

Momen akibat temperatur seragam,  $M_{EUn} = 117,5625 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EUn}}{S_{ac}} = -\frac{117,5625}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,2258 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EUn}}{S_{ac}} = -\frac{117,5625}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,1698 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{EUn}}{S_{bc}} = \frac{117,5625}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,3063 \text{ MPa}$$

i. Beban gempa

Momen akibat beban gempa,  $M_{EQ} = 528,4057 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EQ}}{S_{ac}} = -\frac{528,4057}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -1,0149 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{EQ}}{S'_{ac}} = -\frac{528,4057}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,7631 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{EQ}}{S_{bc}} = \frac{528,4057}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 1,3768 \text{ MPa}$$

### 3. Kontrol Tegangan Beton Terhadap Kombinasi Pembebanan

Pada kontrol tegangan akibat kombinasi pembebanan, tegangan yang terjadi akibat beban dijumlahkan sesuai dengan kombinasi pembebanan pada SNI-1725-2016. Tegangan akibat kombinasi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 5.26.

**Tabel 5. 26 Tegangan Beton Akibat Kombinasi Pembebanan**

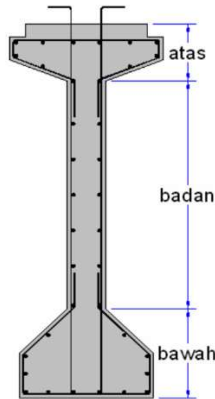
Kombinasi	Letak	MS Precast	MS Cor	MA	PR	SR	TD	TB	EWL	EU <sub>n</sub>	EQ	Tegangan Kombinasi	Tegangan Ijin	Keterangan
Kuat I	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196	-5,426	-0,162		-0,226		-11,912	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367	-4,080	-0,122		-0,170		-10,423	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182	7,361	0,220		0,306		-5,630	18,675	AMAN
Kuat II	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196	-5,426	-0,162		-0,226		-11,912	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367	-4,080	-0,122		-0,170		-10,423	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182	7,361	0,220		0,306		-5,630	18,675	AMAN
Kuat III	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196				-0,226		-6,324	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367				-0,170		-6,221	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182				0,306		-13,211	18,675	AMAN
Kuat IV	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196				-0,226		-6,324	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367				-0,170		-6,221	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182				0,306		-13,211	18,675	AMAN
Kuat V	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196			-0,162	-0,226		-6,486	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367			-0,122	-0,170		-6,343	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182			0,220	0,306		-12,991	18,675	AMAN
Ekstrem I	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196	-5,426	-0,162			-1,015	-12,701	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367	-4,080	-0,122			-0,763	-11,016	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182	7,361	0,220			1,377	-4,560	18,675	AMAN
Ekstrem II	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196	-5,426	-0,162				-11,686	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367	-4,080	-0,122				-10,253	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182	7,361	0,220				-5,937	18,675	AMAN

Tabel 5.26 Lanjutan

Kombinasi	Letak	<i>MS Precast</i>	<i>MS Cor</i>	<i>MA</i>	<i>PR</i>	<i>SR</i>	<i>TD</i>	<i>TB</i>	<i>EWL</i>	<i>EUn</i>	<i>EQ</i>	Tegangan Kombinasi	Tegangan Ijin	Keterangan
Layan I	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196	-5,426	-0,162	-0,162	-0,226		-12,074	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367	-4,080	-0,122	-0,122	-0,170		-10,545	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182	7,361	0,220	0,220	0,306		-5,410	18,675	AMAN
Layan II	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196	-5,426	-0,162		-0,226		-11,912	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367	-4,080	-0,122		-0,170		-10,423	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182	7,361	0,220		0,306		-5,630	18,675	AMAN
Layan III	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196	-5,426	-0,162		-0,226		-11,912	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367	-4,080	-0,122		-0,170		-10,423	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182	7,361	0,220		0,306		-5,630	18,675	AMAN
Layan IV	<i>fac</i>	-3,689	-2,756	-0,636	4,178	-3,196				-0,226		-6,324	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-2,774	-2,073	-0,478	1,639	-2,367				-0,170		-6,221	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	5,004	3,740	0,862	-19,942	-3,182				0,306		-13,211	18,675	AMAN

### 5.4.6 Perhitungan Baja Tulangan

Untuk perhitungan baja non-prategang, *PCI-Girder* dibagi menjadi tiga bagian yaitu bagian atas, bagian tengah dan bagian bawah yang digambarkan pada Gambar 5.40.



**Gambar 5. 40 Pembagian Penampang pada Penampang Melintang *PCI-Girder***

(Sumber : Ilham, 2008, 15 Maret 2017)

Baja tulangan yang dipakai pada balok prategang adalah baja D-13. Berdasarkan RSNI-T-12-2004 (2004) rasio tulangan non prategang minimum adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\rho &= 0,04 \cdot \frac{f_c}{f_y} \\ &= 0,04 \cdot \frac{41,5}{400} \\ &= 0,42\% \approx \rho = 0,5\%\end{aligned}$$

Luas 1 buah tulangan,

$$\begin{aligned}A_{ID} &= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \\ &= \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 \\ &= 132,73 \text{ mm}^2 \\ &= 0,000133 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Perhitungan baja non-prategang dapat dilihat pada persamaan berikut.

1. Bagian Atas

$$\begin{aligned} \text{Rasio tulangan susut, } \rho &= 0,5 \% \\ \text{Luas tampang bagian atas, } A_{atas} &= 0,2060 \text{ m}^2 \\ \text{Luas tulangan bagian atas, } A_{s_{atas}} &= \rho \cdot A_{atas} = 0,5\% \cdot 0,2060 \\ &= 0,00103 \text{ m}^2 \\ \text{Jarak tulangan, } s &= \frac{A_{ID} \cdot 1000}{A_{s_{atas}}} \\ &= \frac{0,000133 \cdot 1000}{0,00103} \\ &= 128,8663 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dipakai tulangan D13-100.

2. Bagian Badan

$$\begin{aligned} \text{Rasio tulangan susut, } \rho &= 0,5 \% \\ \text{Luas tampang bagian badan, } A_{badan} &= 0,1760 \text{ m}^2 \\ \text{Luas tulangan bagian badan, } A_{s_{badan}} &= \rho \cdot A_{badan} = 0,5\% \cdot 0,1760 \\ &= 0,00088 \text{ m}^2 \\ \text{Jarak tulangan, } s &= \frac{A_{ID} \cdot 1000}{A_{s_{atas}}} \\ &= \frac{0,000133 \cdot 1000}{0,00088} \\ &= 150,8321 \text{ mm} \end{aligned}$$

Dipakai tulangan D13-120.

3. Bagian Bawah

$$\begin{aligned} \text{Rasio tulangan susut, } \rho &= 0,5 \% \\ \text{Luas tampang bagian bawah, } A_{bawah} &= 0,2875 \text{ m}^2 \\ \text{Luas tulangan bagian bawah, } A_{s_{bawah}} &= \rho \cdot A_{bawah} = 0,5\% \cdot 0,2875 \\ &= 0,001438 \text{ m}^2 \end{aligned}$$



Jarak tulangan,

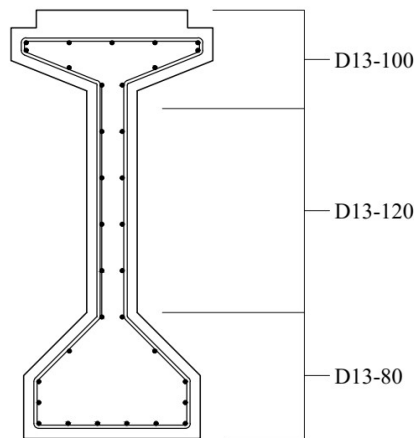
$$s = \frac{A_{ID} \cdot 1000}{A_{s_{atas}}}$$

$$= \frac{0,000133 \cdot 1000}{0,001438}$$

$$= 92,34 \text{ mm}$$

Dipakai tulangan D13-80.

Detail tulangan non-prategang yang digunakan berdasarkan hasil perhitungan dapat dilihat pada Gambar 5.41.



**Gambar 5. 41 Penampang Melintang *PCI-Girder* dengan Detail Penulangan**

#### 5.4.7 Kekuatan Batas Lentur (*Ultimate Flexural Capacity*)

Kekuatan batas lentur *PCI-Girder* dihitung dengan langkah-langkah sebagai berikut.

Modulus elastisitas baja prategang,  $E_s = 193000 \text{ MPa}$

Luas tampang balok komposit,  $A_c = 0,9323 \text{ m}^2$

Luas tampang tendon,  $A_p = 0,0055 \text{ m}^2 = 5527,76 \text{ mm}^2$

Tegangan leleh *strand*,  $f_y = 1675 \text{ MPa}$

Tegangan ultimit *strand*,  $f_{pu} = 1860 \text{ MPa}$

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = \frac{1675}{1860} = 0,9005, \text{ maka berdasarkan Tabel 3.10, } \gamma = 0,28$$

$$\rho_p = \frac{A_p}{A_c} = \frac{0,0055}{0,9323} = 0,0059$$

$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0,85 - \frac{0,05}{7}(f'_c - 30) \\ &= 0,85 - \frac{0,05}{7}(41,5 - 30) \\ &= 0,7679\end{aligned}$$

Menghitung kedalaman efektif balok

Tinggi *PCI-Girder* komposit,  $H = 1,7$  m

Tebal *slab* jembatan,  $h_0 = 0,2$  m

Titik berat tendon terhadap alas,  $Z_0 = 0,15$  m

Kedalaman efektif *PCI-Girder*

$$d = H + h_0 - Z_0 = 1,7 + 0,2 - 0,15 = 1,75 \text{ m}$$

Tegangan baja prategang saat  $M_n$  dicapai,

$$\begin{aligned}f_{ps} &= f_{pu} \cdot \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_c} \right\} \\ &= 1860 \cdot \left\{ 1 - \frac{0,28}{0,7686} \cdot 0,0059 \cdot \frac{1860}{41,5} \right\} \\ &= 1679,7545 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Tegangan ijin Tarik baja prategang,

$$f_{ps} = 0,82 \cdot f_{py} = 0,82 \cdot 1675 = 1373,5 \text{ MPa}$$

Maka dipakai  $f_{ps} = 1373,5$  MPa

Gaya tarik baja prategang saat  $M_n$  dicapai,

$$\begin{aligned}T_s &= A_p \cdot f_{ps} = 5527,76 \cdot 1373,5 = 7592378,4 \text{ N} \\ &= 7592,3784 \text{ kN}\end{aligned}$$

Gaya tarik pada baja prategang sama dengan gaya desak yang terjadi pada beton, maka luas penampang beton yang menerima gaya tekan dapat dihitung sebagai berikut.

$$A_{cc} = \frac{T_s}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{7592378,4}{0,85 \cdot 41,5} \cdot 10^{-6} = 0,2152 \text{ m}^2$$

Tinggi balok tekan,

$a = \frac{A_{cc}}{b}$ , diasumsikan garis netral terletak pada slab jembatan,

Maka  $b_{eff} = 1,3138 \text{ m}$

$h = 0,2 \text{ m}$

$$= \frac{0,2152}{1,3138}$$

$= 0,1638 \text{ m} < h = 0,2 \text{ m}$ , maka asumsi benar.

Tulangan non-prategang pada desain gelagar prategang diabaikan, maka momen nominal dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} M_n &= T_s \cdot (d - a/2) \\ &= 7592,3784 \cdot (1,75 - 0,1638/2) \\ &= 12664,7647 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,8 \cdot 12664,7647 = 10131,8117 \text{ kNm}$$

#### 5.4.8 Kontrol Momen Ultimit Akibat Kombinasi Pembebanan

Momen ultimit akibat kombinasi pembebanan dihitung dengan cara mengalikan momen akibat beban dengan faktor beban ultimit sesuai SNI-1725-2016 (2016). Momen ultimit akibat kombinasi beban dapat dilihat pada Tabel 5.27.

**Tabel 5. 27 Momen Ultimit Akibat Kombinasi Pembebanan**

Kecadaan Batas	MS (Berat Sendiri)		MA Mati Tambahan	PR Prategang	SH Susut Rangkak	TD Lajur "D"	TB Rem	EWL Angin Kendaraan	EUn Temperatur Seragam	EQ Gempa	Momen Ultimit <i>Mu</i>	Keterangan
	Pracetak	Cor Ditempat										
Kuat I	2304,754	1865,784	661,838	-5328,929	981,216	5084,910	151,875		141,075		5862,522	AMAN
Kuat II	2304,754	1865,784	661,838	-5328,929	981,216	3954,930	118,125		141,075		4698,792	AMAN
Kuat III	2304,754	1865,784	661,838	-5328,929	981,216				141,075		625,737	AMAN
Kuat IV	2304,754	1865,784	661,838	-5328,929	981,216				141,075		625,737	AMAN
Kuat V	2304,754	1865,784	661,838	-5328,929	981,216			84,471	141,075		710,209	AMAN
Ekstrem I	2304,754	1865,784	661,838	-5328,929	981,216	847,485	25,313			528,406	1885,866	AMAN
Ekstrem II	2304,754	1865,784	661,838	-5328,929	981,216	1412,475	42,188				1939,325	AMAN
Layan I	1920,628	1435,219	330,919	-5328,929	1962,432	2824,950	84,375	84,471	141,075		3455,140	AMAN
Layan II	1920,628	1435,219	330,919	-5328,929	1962,432	3672,435	109,688		141,075		4243,466	AMAN
Layan III	1920,628	1435,219	330,919	-5328,929	1962,432	2259,960	67,500		141,075		2788,803	AMAN
Layan IV	1920,628	1435,219	330,919	-5328,929	1962,432				141,075		461,343	AMAN
Fatik						2118,713	63,281				2181,994	AMAN

Momen ultimit akibat beban ( $M_u$ ) lebih kecil dari momen ultimit balok prategang ( $\emptyset \cdot M_{pr} = 10131,8117$  kNm), maka desain balok prategang aman terhadap momen akibat kombinasi pembebanan.

#### 5.4.9 Lendutan pada PCI-Girder

Lendutan pada *PCI-Girder* dihitung berdasarkan pada tahap pembebanan dan berdasarkan beban yang terjadi pada *PCI-Girder*.

##### 1. Lendutan Berdasarkan pada Tahap Pembebanan

Tahap-tahap pembebanan pada *PCI-Girder* adalah tahapan saat transfer, tahapan setelah pelat selesai di cor dan tahapan saat *PCI-Girder* dan pelat sudah menjadi komposit. Detail perhitungan lendutan pada setiap tahap pembebanan adalah sebagai berikut.

###### a. Lendutan Saat Transfer

Data yang diperlukan dalam perhitungan lendutan pada saat transfer adalah sebagai berikut.

Modulus elastisitas beton saat transfer,  $E_{ci} = 31904193$  kPa

Panjang bentang balok prategang,  $L = 30$  m

Gaya prategang awal,  $P_t = 6995,0183$  kN

Eksentrisitas penampang,  $e_s = 0,6666$  m

Momen inersia penampang,  $I = 0,2364$  m<sup>4</sup>

Beban akibat berat sendiri PCI,  $Q_{bs} = 17,0723$  kN/m

$$\begin{aligned} Q_{pt} &= \frac{8 \cdot P_t \cdot e_s}{L^2} \\ &= \frac{8 \cdot 6995,0183 \cdot 0,6666}{30^2} \\ &= 41,4473 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{(-Q_{pt} + Q_b) \cdot L^4}{E_c \cdot I} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{(-41,4473 + 17,0723) \cdot 30^4}{31904193 \cdot 0,2364} \right) \\ &= -0,0341 \text{ m} < 0, \text{ maka terjadi } chamber. \end{aligned}$$

###### b. Lendutan Setelah Pelat Dicor (Beton Muda)

Data yang diperlukan dalam perhitungan lendutan setelah pelat dicor adalah sebagai berikut.

Modulus elastisitas beton,  $E_c = 35669973$  kPa

Panjang bentang balok prategang,  $L = 30$  m

Gaya prategang efektif,	$P_{eff}$	=5646,4096 kN
Eksentrisitas penampang,	$e_s$	=0,6666 m
Momen inersia penampang,	$I$	=0,2364 m <sup>4</sup>
Beban akibat berat sendiri PCI,	$Q_b$	=17,0723 kN/m
Beban akibat berat <i>slab</i> ,	$Q_{slab}$	=9,25 kN/m
Beban akibat prategang efektif,		

$$Q_{peff} = \frac{8 \cdot P_{eff} \cdot e_s}{L^2}$$

$$= \frac{8 \cdot 5646,4096 \cdot 0,6666}{30^2}$$

$$= 33,4565 \text{ kN/m}$$

Beban akibat berat sendiri+*slab*,

$$Q_{b+slab} = Q_b + Q_{slab}$$

$$= 17,0723 + 9,25$$

$$= 26,3223 \text{ kN/m}$$

$$\delta = \frac{5}{384} \left( \frac{(-Q_{peff} + Q_{b+slab}) \cdot L^4}{E_c \cdot I} \right)$$

$$= \frac{5}{384} \left( \frac{(-33,4565 + 26,3223) \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,2364} \right)$$

$$= -0,0089 \text{ m} < 0, \text{ maka terjadi } chamber.$$

c. Lendutan Setelah Pelat dan Balok Menjadi Komposit

Data yang diperlukan pada perhitungan lendutan balok komposit adalah sebagai berikut.

Modulus elastisitas beton,	$E_c$	=35669973 kPa
Panjang bentang balok prategang,	$L$	=30 m
Gaya prategang efektif,	$P_{eff}$	=5646,4096 kN
Eksentrisitas penampang komposit,	$e_s$	=0,9438 m
Momen inersia penampang komposit,	$I_c$	=0,4198 m <sup>4</sup>
Beban akibat berat sendiri PCI,	$Q_b$	=17,0723 kN/m
Beban akibat berat <i>slab</i> ,	$Q_{slab}$	=9,25 kN/m
Beban akibat berat PCI dan <i>slab</i> ,	$Q_{b+slab}$	=26,3223 kN/m

Beban akibat prategang efektif,

$$\begin{aligned} Q_{peff} &= \frac{8 \cdot P_{eff} \cdot e_s}{L^2} \\ &= \frac{8 \cdot 5646,4096 \cdot 0,9438}{30^2} \\ &= 47,3683 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{(-Q_{peff} + Q_{balok+pelat}) \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{(-47,3683 + 26,3223) \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= -0,0148 \text{ m} < 0, \text{ maka terjadi } chamber. \end{aligned}$$

## 2. Lendutan Akibat Beban

Lendutan akibat setiap beban yang bekerja pada gelagar dihitung untuk menentukan lendutan total akibat beban.

Momen inersia *PCI-Girder* komposit,  $I_c = 0,4198 \text{ m}^4$

Modulus elastisitas beton,  $E_c = 35669973 \text{ MPa}$

Berikut ini adalah perhitungan lendutan akibat setiap beban yang bekerja pada gelagar.

### a. Lendutan Akibat Berat Sendiri

Beban merata akibat berat sendiri,  $Q_{MS} = 29,8298 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{Q_{MS} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{29,8298 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0210 \text{ m} \end{aligned}$$

### b. Lendutan Akibat Beban Mati Tambahan

Beban merata akibat beban mati tambahan,  $Q_{MA} = 2,9415 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{Q_{MA} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{2,9415 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0021 \text{ m} \end{aligned}$$

## c. Lendutan Akibat Beban Lajur “D”

Beban merata akibat beban lajur “D”,  $Q_{TD} = 16,65 \text{ kN/m}$

Beban titik akibat beban lajur “D”,  $P_{TD} = 126,91 \text{ kN}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{Q_{TD} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) + \frac{1}{48} \left( \frac{P_{TD} \cdot L^3}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{16,65 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) + \frac{1}{48} \left( \frac{126,91 \cdot 30^3}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0165 \text{ m}\end{aligned}$$

## d. Lendutan Akibat Beban Rem

Beban titik akibat beban rem,  $P_{TB} = 11,25 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{1}{48} \left( \frac{P_{TB} \cdot L^3}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{1}{48} \left( \frac{11,25 \cdot 30^3}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0004 \text{ m}\end{aligned}$$

## e. Lendutan Akibat Beban Angin Kendaraan

Beban merata akibat beban angin,  $Q_{EW} = 0,7509 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{Q_{EW} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{0,7509 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0005 \text{ m}\end{aligned}$$

## f. Lendutan Akibat Pengaruh Temperatur Seragam

Beban merata akibat beban temperatur seragam,  $Q_{EW} = 1,045 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{Q_{EW} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{1,045 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0007 \text{ m}\end{aligned}$$



## g. Lendutan Akibat Beban Gempa

Beban merata akibat beban gempa,  $Q_{EQ} = 4,6969 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{384} \left( \frac{Q_{EQ} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{384} \left( \frac{4,6969 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0033 \text{ m}\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan sebelumnya, lendutan masing-masing beban dapat dilihat pada Tabel 5.28.

**Tabel 5. 28 Rekapitulasi Lendutan pada Balok**

No.	Jenis Beban		Lendutan (m)	Keterangan
<b>Lendutan pada keadaan awal</b>				
1	Saat transfer		-0,0341	<i>Chamber</i>
2	Setelah pelat selesai di cor		-0,0089	<i>Chamber</i>
3	Setelah menjadi komposit		-0,0148	<i>Chamber</i>
<b>Lendutan akibat pembebanan</b>				
1	Berat sendiri	<i>MS</i>	0,0210	<i>Deflection</i>
2	Beban mati tambahan	<i>MA</i>	0,0021	<i>Deflection</i>
3	Beban Lajur "D"	<i>TD</i>	0,0165	<i>Deflection</i>
4	Gaya rem	<i>TB</i>	0,0004	<i>Deflection</i>
5	Beban angin	<i>EW</i>	0,0005	<i>Deflection</i>
6	Temperatur seragam	<i>EUn</i>	0,0007	<i>Deflection</i>
7	Beban gempa	<i>EQ</i>	0,0033	<i>Deflection</i>
Lendutan Total			0,0446	m

Lendutan maksimum yang diijinkan adalah sebagai berikut.

$$\delta = \frac{L}{240} = 0,1275 \text{ m} > \text{Lendutan total } \delta = 0,0446 \text{ m}$$

Maka, desain gelagar prategang aman terhadap lendutan yang terjadi akibat beban.

#### 5.4.10 Tulangan Geser Balok Prategang

Dalam proses desain tulangan geser, gaya geser tiap pembebanan sudah dihitung pada Tabel 5.11 dengan kombinasi beban sesuai dengan SNI-1725-2016 (2016). Dari semua kombinasi, dipilih kombinasi yang menghasilkan gaya geser terbesar untuk dipakai dalam perhitungan tulangan geser. Kombinasi terbesar yang digunakan untuk perhitungan tulangan geser adalah kombinasi “Kuat I”.

Perhitungan tulangan geser balok prategang adalah sebagai berikut.

Gaya prategang efektif,  $P_{eff} = 5646,4096 \text{ kN}$

Kuat tekan beton,  $f'_c = 41,5 \text{ MPa}$

Luas penampang *PCI*,  $A = 0,6695 \text{ m}^2$

Lebar penampang *PCI-Girder*,  $b_w = 0,2 \text{ m}$

Luas penampang *PCI* tumpuan,  $A_{tump} = 1,3220 \text{ m}^2$

Lebar penampang *PCI-Girder* tumpuan,  $b_w = 0,7 \text{ m}$

Tinggi efektif *PCI-Girder*,  $d = 1,55 \text{ m}$

Kekuatan geser maksimum dari tulangan,

$$\begin{aligned} V_{s \max} &= \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \\ &= \frac{2}{3} \cdot \sqrt{41,5} \cdot 200 \cdot 1550 \cdot 10^{-3} \\ &= 1331,3569 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tegangan leleh tulangan,  $f_y = 400 \text{ MPa}$

Diameter tulangan geser,  $D = 13 \text{ mm}$

Jenis tulangan geser,  $n = 2 \text{ kaki}$

Luas 1 tulangan geser,

$$\begin{aligned} A_v &= n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \\ &= 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 \\ &= 265,4646 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Kekuatan geser dari beton di tumpuan,

$$\begin{aligned} V_c &= \left(1 + \frac{0,3 \cdot N_u}{A_g}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{6} \cdot b_w \cdot d \\ &= \left(1 + \frac{0,3 \cdot 5646409,6}{1322000}\right) \cdot \frac{\sqrt{41,5}}{6} \cdot 700 \cdot 1550 \cdot 10^{-3} \\ &= 2657,6104 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kekuatan geser dari beton di lapangan,

$$\begin{aligned} V_c &= \left(1 + \frac{0,3 \cdot N_u}{A_g}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{6} \cdot b_w \cdot d \\ &= \left(1 + \frac{0,3 \cdot 5646409,6}{669500}\right) \cdot \frac{\sqrt{41,5}}{6} \cdot 200 \cdot 1550 \cdot 10^{-3} \\ &= 1174,9661 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berdasarkan RSNI T-02-2004, faktor reduksi geser adalah  $\phi=0,7$ . Berikut ini adalah perhitungan tulangan geser pada jarak 3 m dari tumpuan.

Kekuatan geser dari tulangan geser yang diperlukan,

$$\begin{aligned} V_s &= V_u / \phi - V_c \\ &= 881,8536 / 0,7 - 1174,9661 \\ &= 84,8247 \text{ kN} < V_{s \max} = 1331,3569 \text{ kN} \quad \text{OK} \end{aligned}$$

$V_s < \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d = 665,6784 \text{ kN}$ , maka berdasarkan RSNI T-02-2004, jarak antar tulangan geser maksimum adalah

$$s_{\max} = \frac{d}{2} = \frac{1550}{2} = 775 \text{ mm}; \text{ atau}$$

$$s_{\max} = 600 \text{ mm},$$

maka digunakan  $s_{\max} = 600 \text{ mm}$ .

Jarak antar tulangan geser yang diperlukan,

$$\begin{aligned} s &= \frac{A_v f_y \cdot d}{V_s} \\ &= \frac{265,4646 \cdot 400 \cdot 1550}{84,8247} \\ &= 1940,33 \text{ mm} \text{ digunakan } s = 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$s < s_{\max} = 600 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

Tulangan geser pada jarak 3-4 m dari tumpuan menggunakan tulangan geser 2-D13-300. Perhitungan pada jarak yang lain dilakukan dengan prosedur yang sama dengan hasil perhitungan dicantumkan pada Tabel 5.29.

**Tabel 5. 29 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Tulangan Geser**

<i>x</i>	<i>V<sub>u</sub></i>	<i>V<sub>u</sub>/Ø</i>	<i>V<sub>c</sub></i>	<i>V<sub>s</sub></i>	<i>S</i>	<i>S pakai</i>	Keterangan
m	kN	kN	kN	kN	mm	mm	
0	1353,08	1932,97	2657,61	-724,64	-227,13	150	2-D13-150
1	1278,90	1827,00	2657,61	-830,61	-198,15	150	2-D13-150
1	1030,21	1471,73	2657,61	-1185,88	-138,79	150	2-D13-150
2	956,03	1365,76	2657,61	-1291,85	-127,40	150	2-D13-150
3	881,85	1259,79	1174,97	84,82	1940,33	150	2-D13-150
4	807,68	1153,82	1174,97	-21,14	-7784,36	300	2-D13-300
5	733,50	1047,85	1174,97	-127,11	-1294,80	300	2-D13-300
6	659,32	941,88	1174,97	-233,08	-706,14	300	2-D13-300
7	585,14	835,91	1174,97	-339,05	-485,43	300	2-D13-300
8	510,96	729,95	1174,97	-445,02	-369,84	600	2-D13-600
9	436,78	623,97	1174,97	-550,99	-298,71	600	2-D13-600
10	362,60	518,01	1174,97	-656,96	-250,53	600	2-D13-600
11	288,42	412,04	1174,97	-762,93	-215,73	600	2-D13-600
12	214,25	306,06	1174,97	-868,90	-189,42	600	2-D13-600
13	140,07	200,10	1174,97	-974,87	-168,83	600	2-D13-600
14	65,89	94,13	1174,97	-1080,84	-152,28	600	2-D13-600
15	8,29	11,84	1174,97	-1163,12	-141,51	600	2-D13-600

Berdasarkan hasil perhitungan tulangan geser pada Tabel 5.29, dapat dihitung jumlah tulangan geser yang diperlukan pada seluruh gelagar jembatan. Berikut ini adalah perhitungan jumlah tulangan pada gelagar jembatan.

1. Jumlah tulangan geser pada bentang 0 m sampai 4 m.

Jarak tulangan geser pada bentang 0 m sampai 4 m adalah 150 mm, sehingga jumlah tulangan yang digunakan pada bentang tersebut adalah sebagai berikut.

$$n_l = \frac{L_2 - L_1}{s}$$

$$= \frac{4-0}{150 \cdot 10^{-3}}$$

$$= 26,67 \approx 27 \text{ tulangan geser}$$

2. Jumlah tulangan geser pada bentang 4 m sampai 8 m.

Jarak tulangan geser pada bentang 4 m sampai 8 m adalah 300 mm, sehingga jumlah tulangan yang digunakan pada bentang tersebut adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n_2 &= \frac{L_2 - L_1}{s} \\
 &= \frac{8 - 4}{300 \cdot 10^{-3}} \\
 &= 13,33 \approx 14 \text{ tulangan geser}
 \end{aligned}$$

3. Jumlah tulangan geser pada bentang 8 sampai 15 m.

Jarak tulangan geser pada bentang 8 m sampai 15 m adalah 600 mm, sehingga jumlah tulangan yang digunakan pada bentang tersebut adalah sebagai berikut.

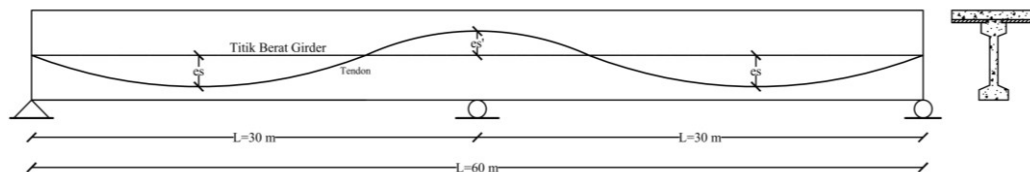
$$\begin{aligned}
 n_3 &= \frac{L_2 - L_1}{s} \\
 &= \frac{15 - 8}{600 \cdot 10^{-3}} \\
 &= 11,67 \approx 12 \text{ tulangan geser.}
 \end{aligned}$$

Perhitungan tersebut untuk  $\frac{1}{2}$  bentang jembatan, dimana pada Jembatan Sambiroto terdapat 2 bentang gelagar dengan 5 baris *PCI-Girder*. Maka, jumlah keseluruhan tulangan geser adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n_t &= (n_1 + n_2 + n_3) \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \\
 &= (27 + 14 + 12) \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \\
 &= 1060 \text{ tulangan geser}
 \end{aligned}$$

## 5.5 Perhitungan Gelagar Prategang Balok Menerus

Pada sub bab ini akan dijabarkan proses perhitungan gelagar prategang penampang “I” yang ditumpu secara menerus. Ilustrasi tampak samping dari gelagar prategang struktur balok menerus dapat dilihat pada Gambar 5.42.



**Gambar 5. 42 Tampak Samping Gelagar Prategang Struktur Balok Menerus**

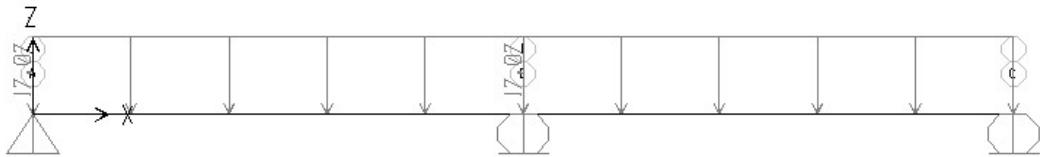
### 5.5.1 Momen dan Gaya Geser

Pembebanan Jembatan Sambiroto ini mengacu pada Standar Pembebanan untuk Jembatan SNI-1725-2016 (2016). Rekapitulasi hasil perhitungan pembebanan balok prategang dapat dilihat pada Tabel 5.30.

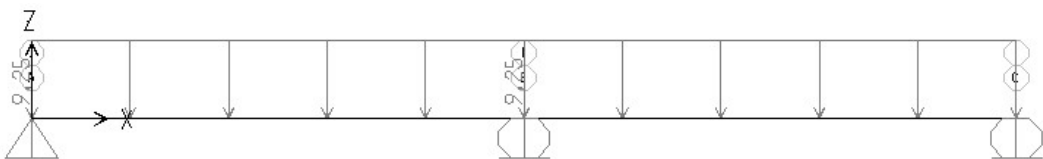
**Tabel 5. 30 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Pembebanan Balok Prategang**

No.	Jenis Beban	Kode beban	$Q$ (kN/m)	$P$ (kN)	$M$ (kNm)
1	Berat balok prategang	balok	17,0723	-	-
2	Berat pelat	plat	9,2500	-	-
3	Beton cor ditempat	cor	12,7575	-	-
4	Berat sendiri	<i>MS</i>	29,8298	-	-
5	Mati tambahan	<i>MA</i>	2,9415	-	-
6	Lajur "D"	<i>TD</i>	16,6500	126,9100	-
7	Gaya rem	<i>TB</i>	-	11,2500	-
8	Angin kendaraan	<i>EW<sub>L</sub></i>	0,7509	-	-
9	Temperatur seragam	<i>QEU<sub>n</sub></i>	1,0450	-	117,5625
10	Gempa	<i>EQ</i>	4,6969	-	-

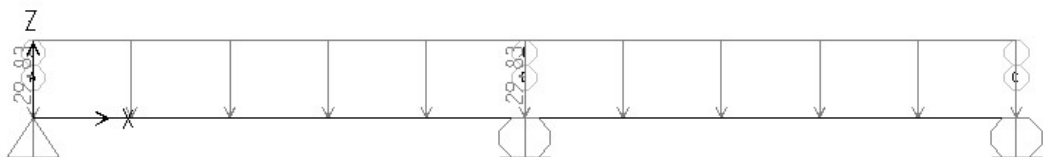
Analisis momen dan gaya geser pada balok menerus menggunakan program SAP2000 v14. Permodelan beban-beban menggunakan program SAP2000 v14 dapat dilihat pada Gambar 5.43-Gambar 5.51.



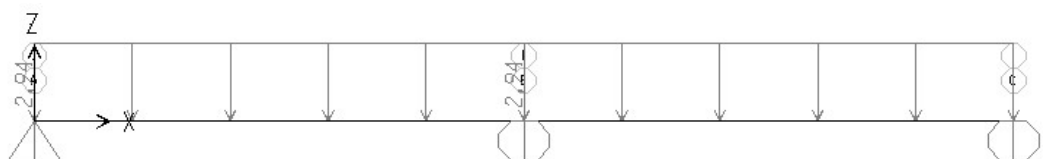
**Gambar 5. 43 Permodelan SAP2000 untuk Berat Sendiri PCI-Girder**



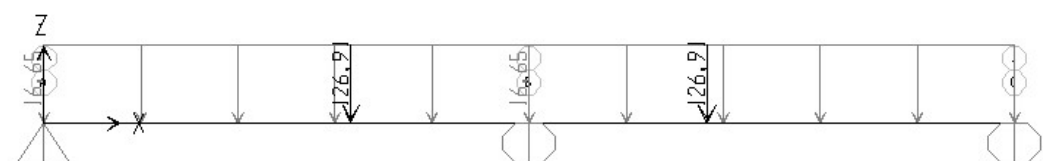
**Gambar 5. 44 Permodelan SAP2000 untuk Berat Pelat**



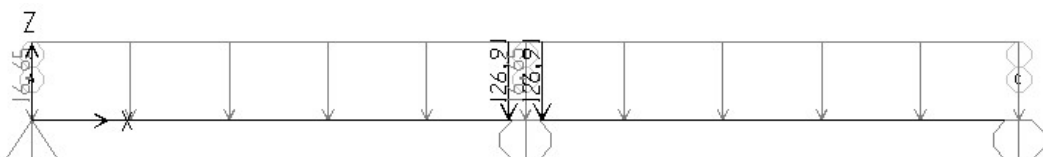
**Gambar 5. 45 Permodelan SAP2000 untuk Berat Sendiri Struktur (MS)**



**Gambar 5. 46 Permodelan SAP2000 untuk Beban Mati Tambahan (MA)**



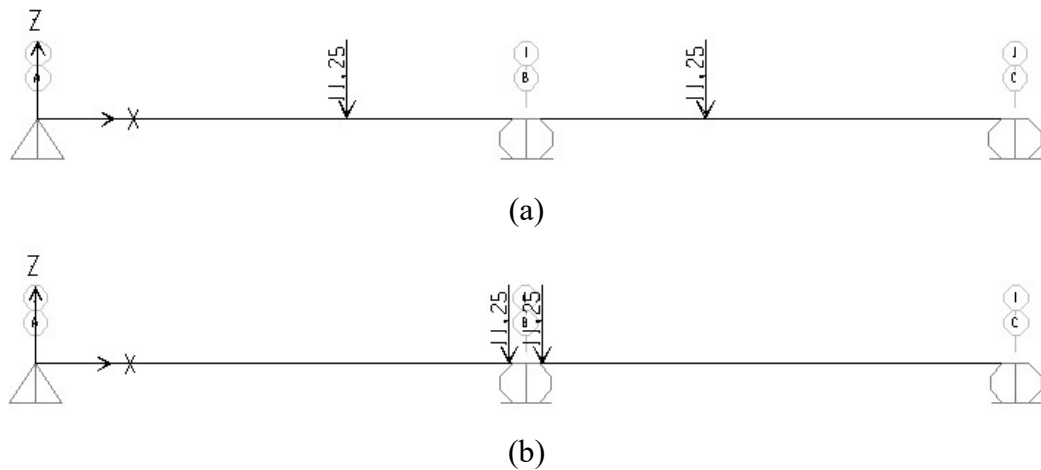
(a)



(b)

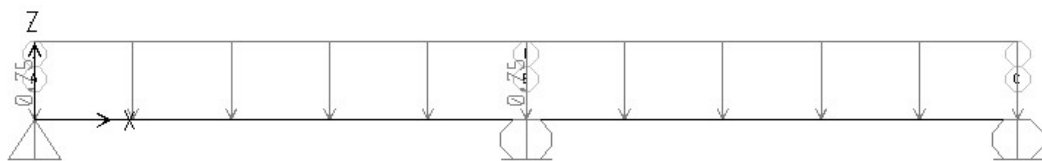
**Gambar 5. 47 Permodelan SAP2000 untuk Beban Lajur "D" (TD) (a) untuk Analisis Momen, (b) untuk Analisis Gaya Geser**

Pada Gambar 5.47, beban garis terpusat (*BGT*) ditempatkan pada  $\frac{5}{8}L=18,75 \text{ m} \approx 19 \text{ m}$  dari tumpuan tepi untuk mendapatkan momen maksimum pada tumpuan tengah dan ditempatkan pada jarak 1 m dari tumpuan tengah untuk mendapatkan gaya geser maksimum.

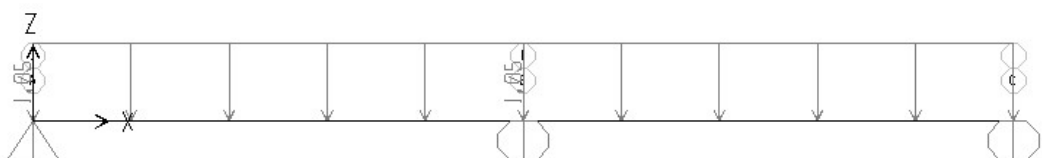


**Gambar 5. 48 Permodelan SAP2000 untuk Beban Rem (*TB*) (a) untuk Analisis Momen, (b) untuk Analisis Gaya Geser**

Pada Gambar 5.48, beban rem (*TB*) ditempatkan pada  $\frac{5}{8}L=18,75 \text{ m} \approx 19 \text{ m}$  dari tumpuan tepi untuk mendapatkan momen maksimum pada tumpuan tengah dan ditempatkan pada jarak 1 m dari tumpuan tengah untuk mendapatkan gaya geser maksimum..

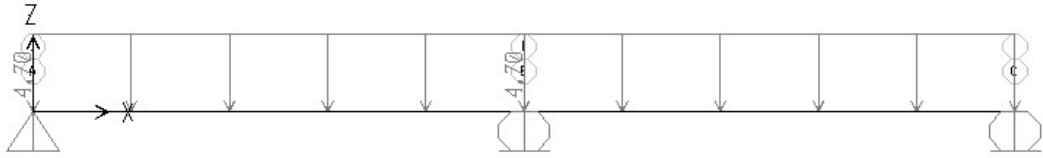


**Gambar 5. 49 Permodelan SAP2000 untuk Beban Angin Kendaraan (*EWL*)**



**Gambar 5. 50 Permodelan SAP2000 untuk Beban Akibat Temperatur Seragam (*EUn*)**





**Gambar 5. 51 Permodelan SAP2000 untuk Beban Gempa (*EQ*)**

Hasil analisis gaya geser dan momen dapat dilihat pada Tabel 5.31 dan Tabel 5.33. Gaya geser dan momen ditambahkan dan dikali dengan faktor beban untuk mendapatkan beban ultimit. Gaya geser dan momen kombinasi dapat dilihat pada Tabel 5.32 dan Tabel 5.34.

**Tabel 5. 31 Momen Akibat Beban pada Balok Prategang**

Jarak <i>X</i>	Berat Balok (kNm)	Berat Pelat (kNm)	Berat Beton Cor (kNm)	Berat Sendiri <i>MS</i> (kNm)	Mati tambahan <i>MA</i> (kNm)	Lajur "D" <i>TD</i> (kNm)	Rem <i>TB</i> (kNm)	Angin <i>EWL</i> (kNm)	Temperatur Seragam	
									<i>EU<sub>n</sub></i> (kNm)	<i>EQ</i> (kNm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	183,53	99,44	137,14	320,67	31,62	201,46	1,99	8,07	11,23	50,49
2	349,99	189,63	261,53	611,52	60,30	386,26	3,98	15,39	21,42	96,29
3	499,37	270,57	373,16	872,53	86,04	554,42	5,97	21,96	30,57	137,39
4	631,68	342,25	472,03	1103,72	108,84	705,92	7,97	27,78	38,67	173,79
5	746,92	404,69	558,15	1305,07	128,69	840,78	9,96	32,85	45,72	205,49
6	845,09	457,88	631,51	1476,60	145,61	958,98	11,95	37,17	51,73	232,50
7	926,19	501,82	692,11	1618,29	159,58	1060,54	13,94	40,74	56,69	254,81
7,5	960,33	520,32	717,62	1677,95	165,46	1105,07	14,94	42,24	58,78	264,20
8	990,21	536,51	739,95	1730,16	170,61	1145,45	15,93	43,55	60,61	272,42
9	1037,16	561,95	775,03	1812,19	178,70	1213,70	17,92	45,62	63,48	285,34
10	1067,04	578,14	797,36	1864,40	183,85	1265,31	19,92	46,93	65,31	293,56
11	1079,85	585,07	806,93	1886,77	186,05	1300,26	21,91	47,50	66,10	297,09
11,25	1079,85	585,08	806,93	1886,78	186,05	1311,50	22,90	47,50	66,10	297,09
12	1075,58	582,76	803,74	1879,32	185,32	1318,57	23,90	47,31	65,84	295,91
13	1054,24	571,20	787,80	1842,04	181,64	1320,22	25,89	46,37	64,53	290,04
14	1015,83	550,39	759,09	1774,92	175,02	1305,23	27,88	44,68	62,18	279,47
15	960,35	520,33	717,63	1677,98	165,46	1273,59	29,87	42,24	58,78	264,21
16	887,79	481,02	663,41	1551,21	152,96	1225,29	31,86	39,05	54,34	244,25
17	798,16	432,46	596,44	1394,60	137,52	1160,35	33,86	35,11	48,86	219,59
18	691,47	374,65	516,71	1208,17	119,14	1078,75	35,85	30,41	42,32	190,23
19	567,69	307,58	424,22	991,91	97,81	980,51	37,84	24,97	34,75	156,18

Tabel 5.31 Lanjutan

Jarak <i>X</i>	Berat Balok (kNm)	Berat Pelat (kNm)	Berat Beton Cor (kNm)	Berat Sendiri <i>MS</i> (kNm)	Mati tambahan <i>MA</i> (kNm)	Lajur "D" <i>TD</i> (kNm)	Rem <i>TB</i> (kNm)	Angin <i>EWL</i> (kNm)	Temperatur Seragam <i>EU<sub>n</sub></i> (kNm)	Gempa <i>EQ</i> (kNm)		
											19	20
19	567,69	307,58	424,22	991,91	97,81	980,51	37,84	24,97	34,75	156,18		
20	426,85	231,27	318,97	745,82	73,54	738,70	28,58	18,77	26,13	117,43		
21	268,93	145,71	200,96	469,89	46,34	480,25	19,32	11,83	16,46	73,99		
22	93,94	50,90	70,20	164,14	16,19	205,15	10,06	4,13	5,75	25,85		
22,5	0,05	0,03	0,03	0,08	0,01	61,35	5,43	0,00	0,00	0,01		
23	-98,12	-53,16	-73,32	-171,44	-16,91	-86,61	0,81	-4,32	-6,01	-26,99		
24	-307,25	-166,47	-229,60	-536,85	-52,94	-395,01	-8,45	-13,51	-18,81	-84,53		
25	-533,46	-289,03	-398,63	-932,09	-91,91	-720,07	-17,71	-23,46	-32,65	-146,76		
26	-776,74	-420,85	-580,43	-1357,16	-133,83	-1061,77	-26,97	-34,16	-47,54	-213,69		
27	-1037,09	-561,91	-774,98	-1812,06	-178,69	-1420,13	-36,23	-45,61	-63,48	-285,32		
28	-1314,51	-712,22	-982,28	-2296,79	-226,49	-1795,13	-45,49	-57,82	-80,46	-361,65		
29	-1609,00	-871,78	-1202,35	-2811,35	-277,23	-2186,79	-54,75	-70,77	-98,49	-442,67		
30	-1920,57	-1040,59	-1435,17	-3355,75	-330,91	-2595,09	-64,00	-84,47	-117,56	-528,38		

Tabel 5. 32 Momen Akibat Kombinasi Pembebanan

Jarak	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II	Daya Layan I	Daya Layan II	Daya Layan III	Daya Layan IV	Fatik
X	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	841,45	760,07	475,25	475,25	483,32	573,29	563,49	577,30	630,26	528,53	365,78	152,59
2	1608,73	1452,63	906,29	906,29	921,68	1093,94	1075,70	1103,17	1204,84	1009,72	697,53	292,68
3	2301,82	2077,66	1293,11	1293,11	1315,08	1561,94	1536,63	1577,61	1723,76	1443,57	995,25	420,29
4	2920,74	2635,18	1635,74	1635,74	1663,52	1977,29	1946,28	2000,63	2187,01	1830,06	1258,95	535,42
5	3465,47	3125,18	1934,15	1934,15	1967,00	2340,00	2304,65	2372,22	2594,58	2169,22	1488,63	638,05
6	3936,03	3547,66	2188,35	2188,35	2225,52	2650,06	2611,75	2692,38	2946,49	2461,02	1684,28	728,20
7	4332,41	3902,62	2398,35	2398,35	2439,09	2907,47	2867,56	2961,12	3242,73	2705,49	1845,90	805,86
7,5	4502,79	4054,78	2486,77	2486,77	2529,01	3016,44	2976,23	3076,20	3369,97	2809,96	1913,95	840,01
8	4654,62	4190,06	2564,14	2564,14	2607,69	3112,24	3072,09	3178,43	3483,29	2902,60	1973,50	871,03
9	4902,64	4409,99	2685,71	2685,71	2731,33	3264,36	3225,35	3344,32	3668,19	3052,37	2067,07	923,72
10	5076,48	4562,40	2763,09	2763,09	2810,02	3363,84	3327,32	3458,78	3797,41	3154,80	2126,62	963,92
11	5176,15	4647,28	2796,25	2796,25	2843,74	3410,67	3378,01	3521,81	3870,97	3209,88	2152,15	991,63
11,25	5198,17	4664,41	2796,25	2796,25	2843,74	3414,34	3384,13	3534,04	3886,87	3219,67	2152,15	1000,80
12	5201,64	4664,65	2785,20	2785,20	2832,51	3404,85	3377,43	3533,42	3888,85	3217,62	2143,64	1006,85
13	5152,95	4614,50	2729,94	2729,94	2776,31	3346,38	3325,56	3493,60	3851,06	3178,01	2101,12	1009,59
14	5030,08	4496,84	2630,48	2630,48	2675,16	3235,27	3222,42	3402,35	3757,61	3091,05	2024,56	999,83
15	4833,03	4311,65	2486,81	2486,81	2529,05	3071,52	3068,00	3259,68	3608,48	2956,75	1913,98	977,59
16	4561,81	4058,94	2298,93	2298,93	2337,98	2855,11	2862,29	3065,58	3403,68	2775,11	1769,38	942,87
17	4216,40	3738,72	2066,84	2066,84	2101,94	2586,06	2605,31	2820,06	3143,22	2546,11	1590,75	895,65
18	3796,82	3350,98	1790,54	1790,54	1820,95	2264,36	2297,05	2523,11	2827,08	2269,78	1378,10	835,95
19	3303,06	2895,72	1470,03	1470,03	1495,00	1890,02	1937,51	2174,74	2455,27	1946,10	1131,42	763,76

Tabel 5.32 Lanjutan

Jarak	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II	Daya Layan I	Daya Layan II	Daya Layan III	Daya Layan IV	Fatik
X	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )	( kNm )
19	3303,06	2895,72	1470,03	1470,03	1495,00	1890,02	1937,51	2174,74	2455,27	1946,10	1131,42	763,76
20	2486,43	2179,52	1105,32	1105,32	1124,09	1421,59	1457,61	1636,77	1848,18	1464,54	850,71	575,46
21	1595,62	1395,80	696,40	696,40	708,22	900,50	926,43	1047,38	1185,43	935,64	535,98	374,68
22	630,64	544,56	243,26	243,26	247,40	326,77	343,97	406,57	467,00	359,40	187,23	161,41
22,5	120,33	93,62	0,12	0,12	0,12	20,16	33,51	66,88	86,91	53,52	0,09	50,09
23	-408,52	-374,20	-254,08	-254,08	-258,39	-299,61	-289,77	-285,67	-307,10	-264,19	-195,55	-64,35
24	-1521,87	-1360,48	-795,63	-795,63	-809,14	-978,63	-974,79	-1029,34	-1136,86	-935,13	-612,36	-302,60
25	-2709,39	-2414,27	-1381,38	-1381,38	-1404,85	-1710,30	-1711,09	-1824,43	-2022,30	-1653,41	-1063,19	-553,33
26	-3971,09	-3535,59	-2011,35	-2011,35	-2045,51	-2494,61	-2498,67	-2670,95	-2963,41	-2419,04	-1548,04	-816,56
27	-5306,96	-4724,42	-2685,52	-2685,52	-2731,14	-3331,58	-3337,52	-3568,90	-3960,19	-3232,01	-2066,93	-1092,27
28	-6717,02	-5980,77	-3403,91	-3403,91	-3461,72	-4221,18	-4227,66	-4518,27	-5012,64	-4092,33	-2619,83	-1380,46
29	-8201,25	-7304,64	-4166,50	-4166,50	-4237,27	-5163,44	-5169,08	-5519,07	-6120,76	-4999,99	-3206,77	-1681,15
30	-9759,67	-8696,03	-4973,30	-4973,30	-5057,77	-6158,34	-6161,77	-6571,29	-7284,55	-5955,00	-3827,72	-1994,32

Tabel 5. 33 Gaya Geser Akibat Beban pada Balok Prategang

Jarak <i>X</i> (m)	Berat Balok (kN)	Berat Pelat (kN)	Berat Beton Cor (kN)	Berat Sendiri <i>MS</i> (kN)	Mati tambahan <i>MA</i> (kN)	Lajur "D" <i>TD</i> (kN)	Rem <i>TB</i> (kN)	Angin <i>EWL</i> (kN)	Temperatur Seragam <i>EUn</i> (kN)	Gempa <i>EQ</i> (kN)
0	-320,10	-173,44	-239,20	-559,31	-55,15	-438,89	-11,23	-14,08	-19,59	-88,07
1	-303,03	-164,19	-226,44	-529,48	-52,21	-422,24	-11,23	-13,33	-18,55	-83,37
1	-303,03	-164,19	-226,44	-529,48	-52,21	-295,33	0,02	-13,33	-18,55	-83,37
2	-285,96	-154,94	-213,69	-499,65	-49,27	-278,68	0,02	-12,58	-17,50	-78,67
3	-268,89	-145,69	-200,93	-469,82	-46,33	-262,03	0,02	-11,83	-16,46	-73,98
4	-251,81	-136,44	-188,17	-439,99	-43,39	-245,38	0,02	-11,08	-15,41	-69,28
5	-234,74	-127,19	-175,41	-410,16	-40,45	-228,73	0,02	-10,33	-14,37	-64,58
6	-217,67	-117,94	-162,66	-380,33	-37,50	-212,08	0,02	-9,57	-13,32	-59,89
7	-200,60	-108,69	-149,90	-350,50	-34,56	-195,43	0,02	-8,82	-12,28	-55,19
8	-183,53	-99,44	-137,14	-320,67	-31,62	-178,78	0,02	-8,07	-11,23	-50,49
9	-166,45	-90,19	-124,38	-290,84	-28,68	-162,13	0,02	-7,32	-10,19	-45,79
10	-149,38	-80,94	-111,63	-261,01	-25,74	-145,48	0,02	-6,57	-9,14	-41,10
11	-132,31	-71,69	-98,87	-231,18	-22,80	-128,83	0,02	-5,82	-8,10	-36,40
12	-115,24	-62,44	-86,11	-201,35	-19,86	-112,18	0,02	-5,07	-7,05	-31,70
13	-98,16	-53,19	-73,35	-171,52	-16,91	-95,53	0,02	-4,32	-6,01	-27,01
14	-81,09	-43,94	-60,60	-141,69	-13,97	-78,88	0,02	-3,57	-4,96	-22,31
15	-64,02	-34,69	-47,84	-111,86	-11,03	-62,23	0,02	-2,82	-3,92	-17,61
16	-46,95	-25,44	-35,08	-82,03	-8,09	-45,58	0,02	-2,07	-2,87	-12,92
17	-29,87	-16,19	-22,33	-52,20	-5,15	-28,93	0,02	-1,31	-1,83	-8,22
18	-12,80	-6,94	-9,57	-22,37	-2,21	-12,28	0,02	-0,56	-0,78	-3,52
19	4,27	2,31	3,19	7,46	0,74	4,37	0,02	0,19	0,26	1,18
20	21,34	11,56	15,95	37,29	3,68	21,02	0,02	0,94	1,31	5,87

Tabel 5.33 Lanjutan

Jarak <i>X</i>	Berat Balok	Berat Pelat	Berat Beton Cor	Berat Sendiri	Mati tambahan	Lajur "D"	Rem	Angin	Temperatur Seragam	Gempa
(m)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
21	38,42	20,81	28,71	67,12	6,62	37,67	0,02	1,69	2,35	10,57
22	55,49	30,06	41,46	96,95	9,56	54,32	0,02	2,44	3,40	15,27
23	72,56	39,31	54,22	126,78	12,50	70,97	0,02	3,19	4,44	19,96
24	89,63	48,56	66,98	156,61	15,44	87,62	0,02	3,94	5,49	24,66
25	106,70	57,81	79,74	186,44	18,39	104,27	0,02	4,69	6,53	29,36
26	123,78	67,06	92,49	216,27	21,33	120,92	0,02	5,44	7,58	34,05
27	140,85	76,31	105,25	246,10	24,27	137,57	0,02	6,20	8,62	38,75
28	157,92	85,56	118,01	275,93	27,21	154,22	0,02	6,95	9,67	43,45
29	174,99	94,81	130,77	305,76	30,15	170,87	0,02	7,70	10,71	48,14
30	192,07	104,06	143,52	335,59	33,09	187,52	0,02	8,45	11,76	52,84

Tabel 5. 34 Gaya Geser Akibat Kombinasi Pembebanan

Jarak	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II	Daya Layan I	Daya Layan II	Daya Layan III	Daya Layan IV	Fatik
X	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
(m)												
0	-1639,12	-1459,07	-828,90	-828,90	-842,98	-1028,49	-1030,45	-1102,17	-1223,12	-998,06	-637,97	-337,59
1	-1564,94	-1391,55	-784,70	-784,70	-798,02	-975,85	-979,17	-1050,74	-1167,45	-950,72	-603,94	-325,10
1	-1316,25	-1198,13	-784,70	-784,70	-798,02	-934,40	-910,09	-912,58	-987,84	-840,19	-603,94	-221,48
2	-1242,07	-1130,61	-740,49	-740,49	-753,07	-881,75	-858,81	-861,15	-932,17	-792,85	-569,92	-208,99
3	-1167,89	-1063,09	-696,28	-696,28	-708,11	-829,11	-807,53	-809,73	-876,50	-745,50	-535,89	-196,51
4	-1093,71	-995,57	-652,07	-652,07	-663,15	-776,46	-756,25	-758,30	-820,83	-698,16	-501,87	-184,02
5	-1019,53	-928,05	-607,86	-607,86	-618,19	-723,81	-704,97	-706,88	-765,16	-650,81	-467,84	-171,53
6	-945,36	-860,53	-563,65	-563,65	-573,23	-671,17	-653,69	-655,45	-709,49	-603,46	-433,82	-159,04
7	-871,18	-793,02	-519,45	-519,45	-528,27	-618,52	-602,41	-604,02	-653,82	-556,12	-399,79	-146,56
8	-797,00	-725,50	-475,24	-475,24	-483,31	-565,87	-551,14	-552,60	-598,15	-508,77	-365,77	-134,07
9	-722,82	-657,98	-431,03	-431,03	-438,35	-513,23	-499,85	-501,17	-542,48	-461,43	-331,74	-121,58
10	-648,64	-590,46	-386,82	-386,82	-393,39	-460,58	-448,58	-449,74	-486,81	-414,08	-297,72	-109,09
11	-574,46	-522,94	-342,61	-342,61	-348,43	-407,93	-397,29	-398,32	-431,14	-366,74	-263,69	-96,61
12	-500,29	-455,42	-298,40	-298,40	-303,47	-355,29	-346,02	-346,89	-375,47	-319,39	-229,67	-84,12
13	-426,11	-387,90	-254,19	-254,19	-258,51	-302,64	-294,74	-295,47	-319,80	-272,05	-195,64	-71,63
14	-351,93	-320,39	-209,99	-209,99	-213,55	-250,00	-243,46	-244,04	-264,13	-224,70	-161,62	-59,14
15	-277,75	-252,87	-165,78	-165,78	-168,59	-197,35	-192,18	-192,61	-208,46	-177,36	-127,59	-46,66
16	-203,57	-185,35	-121,57	-121,57	-123,63	-144,70	-140,90	-141,19	-152,79	-130,01	-93,57	-34,17
17	-129,39	-117,83	-77,36	-77,36	-78,67	-92,06	-89,62	-89,76	-97,12	-82,67	-59,54	-21,68
18	-55,21	-50,31	-33,15	-33,15	-33,72	-39,41	-38,34	-38,34	-41,45	-35,32	-25,52	-9,19
19	18,96	17,21	11,06	11,06	11,25	13,24	12,94	13,09	14,22	12,02	8,51	3,29
20	93,14	84,73	55,27	55,27	56,20	65,88	64,22	64,52	69,89	59,37	42,54	15,78



Tabel 5.34 Lanjutan

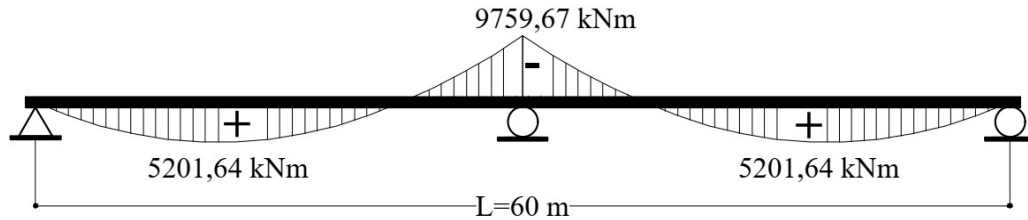
Jarak	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II	Daya Layan I	Daya Layan II	Daya Layan III	Daya Layan IV	Fatig
X	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
(m)												
21	167,32	152,25	99,48	99,48	101,17	118,53	115,50	115,94	125,56	106,72	76,56	28,27
22	241,50	219,76	143,68	143,68	146,12	171,17	166,78	167,37	181,23	154,06	110,59	40,76
23	315,68	287,28	187,89	187,89	191,08	223,82	218,06	218,80	236,90	201,41	144,61	53,24
24	389,86	354,80	232,10	232,10	236,04	276,47	269,34	270,22	292,57	248,75	178,64	65,73
25	464,04	422,32	276,31	276,31	281,00	329,12	320,62	321,65	348,24	296,10	212,66	78,22
26	538,21	489,84	320,52	320,52	325,96	381,76	371,90	373,07	403,91	343,44	246,69	90,71
27	612,39	557,36	364,73	364,73	370,92	434,41	423,18	424,50	459,58	390,79	280,71	103,19
28	686,57	624,87	408,93	408,93	415,88	487,05	474,46	475,93	515,25	438,13	314,74	115,68
29	760,75	692,39	453,14	453,14	460,84	539,70	525,74	527,35	570,92	485,48	348,76	128,17
30	834,93	759,91	497,35	497,35	505,80	592,35	577,01	578,78	626,59	532,82	382,79	140,66

Berdasarkan analisis menggunakan program SAP2000 v14, didapatkan momen maksimum dan gaya geser maksimum pada tiap pembebanan yang ditampilkan pada Tabel 5.35.

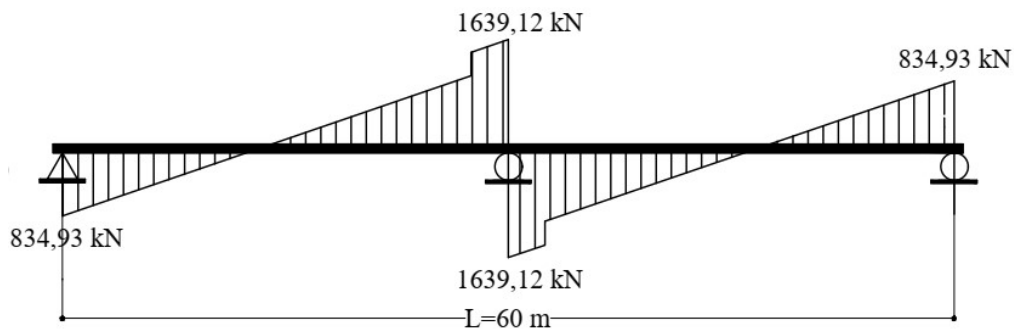
Tabel 5. 35 Rekapitulasi Hasil Analisis Momen dan Gaya Geser Maksimum

No.	Jenis Beban	Momen		Gaya Geser	
		Tumpuan <i>M-</i> (kNm)	Lapangan <i>M+</i> (kNm)	Tumpuan Tepi <i>V</i> (kN)	Tumpuan Tengah <i>V</i> (kN)
1	Beban balok	-1920,572	1079,847	192,0650	-320,1040
2	Beban pelat	-1040,592	585,075	104,0640	-173,4360
3	Beton cor ditempat	-1435,173	806,930	143,5240	-239,2010
4	Berat sendiri	-3355,745	1886,776	335,5890	-559,3050
5	Beban mati tambahan	-330,908	186,054	33,0920	-55,1530
6	Beban lajur "D"	-2595,089	1320,224	187,5240	-438,8860
7	Beban rem	-64,004	37,839	0,0190	-11,2310
8	Beban angin	-84,474	47,496	8,4480	-14,0790
9	Temperatur seragam	-117,559	66,098	11,7560	-19,5940
10	Beban gempa	-528,384	297,085	52,8410	-88,0660

Kombinasi pembebanan berdasarkan SNI-1725-2016 (2016) menghasilkan momen dan gaya geser maksimum pada kombinasi pembebanan “Kuat 1” yang digambarkan dalam bentuk diagram pada Gambar 5.52 dan Gambar 5.53.



**Gambar 5. 52 Diagram Momen akibat Kombinasi Pembebanan “Kuat 1” pada Balok Sederhana**



**Gambar 5. 53 Diagram Gaya Geser akibat Kombinasi Pembebanan “Kuat 1” pada Balok Sederhana**

### 5.5.2 Perhitungan Gaya Prategang, Eksentrisitas dan Jumlah Tendon

Pada sub bab ini akan dijabarkan proses perhitungan gaya prategang, eksentrisitas dan jumlah tendon yang akan digunakan pada balok prategang.

#### 1. Gaya Prategang Awal dan Eksentrisitas Tendon

Besarnya gaya prategang dihitung berdasarkan tegangan ijin beton pada kondisi transfer yaitu saat beton mencapai 80% kuat tekan. Penampang balok saat transfer adalah penampang *PCI* karena transfer gaya prategang dilakukan sebelum pengecoran *slab*.

Tegangan ijin beton pada kondisi awal berdasarkan RSNIT-12-2004 adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan ijin tekan, } f_{ci} = 0,6 \cdot f'_{ci} = 19,92 \text{ MPa} = 19920 \text{ kPa}$$

$$\text{Tegangan ijin tarik, } f_{ti} = 0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} = 1,44 \text{ MPa} = 1440 \text{ kPa}$$

$$\text{Jarak titik berat balok ke atas balok, } y_a = 0,8834 \text{ m}$$

Jarak titik berat balok ke alas,	$y_b$	$=0,8166$ m
Modulus penampang atas,	$S_a$	$=0,2676$ m <sup>3</sup>
Modulus penampang bawah,	$S_b$	$=0,2895$ m <sup>3</sup>
Luas penampang,	$A$	$=0,6695$ m <sup>2</sup>

Perhitungan gaya prategang awal ditinjau dari tegangan beton di lapangan dan tumpuan dimana momen yang terjadi di lapangan adalah momen positif dan momen yang terjadi di tumpuan adalah momen negatif. Eksentrisitas tendon pada daerah lapangan dan daerah tumpuan juga dibedakan untuk menyesuaikan dengan momen yang terjadi akibat beban luar.

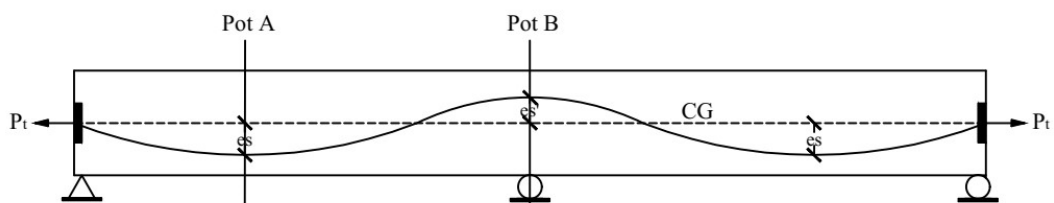
Momen positif akibat berat sendiri balok,  $M_{bs+} = 1079,8460$  kNm

Momen negatif akibat berat sendiri balok,  $M_{bs-} = 1920,5723$  kNm

Jarak titik berat tendon bawah ke alas,  $Z_0 = 0,35$  m

Jarak titik berat tendon bawah ke alas,  $Z_0 = 0,15$  m

Gambar penampang memanjang balok menerus dapat dilihat pada Gambar 5.54.

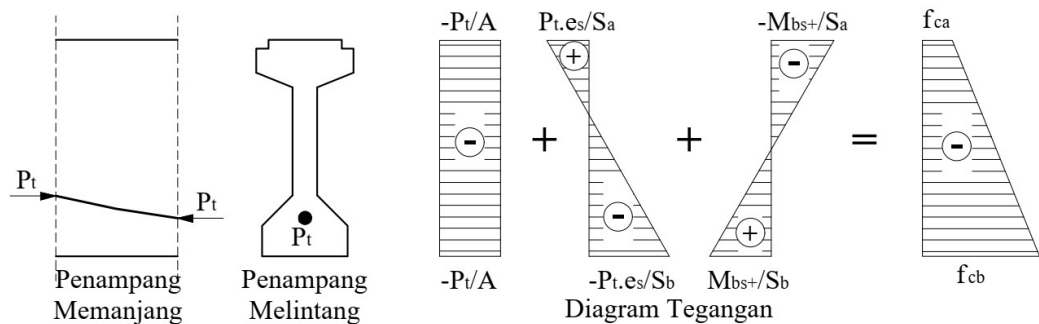


**Gambar 5. 54 Penampang Memanjang Balok Prategang Menerus dengan Keterangan Potongan**

a. Perhitungan tegangan di daerah lapangan

Daerah lapangan pada balok menerus berada pada bentang 0 m sampai  $\frac{3}{4}$  bentang atau 22,5 m dari tumpuan tepi, dengan momen positif maksimum berada pada jarak  $\frac{3}{8}$  bentang atau 11,25 m dari tumpuan tepi.

Diagram tegangan pada saat transfer di daerah lapangan pada potongan A dari Gambar 5.54 dapat dilihat pada Gambar 5.55.



**Gambar 5.55 Diagram Tegangan saat Transfer di Daerah Lapangan (Pot A pada Gambar 5.54)**

Eksentrisitas tendon lapangan,

$$\begin{aligned} e_s &= y_b - Z_0 \\ &= 0,8166 - 0,35 \\ &= 0,4666 \text{ m} \end{aligned}$$

Gaya prategang dihitung dengan menggunakan persamaan tegangan beton di daerah lapangan pada sisi atas dan sisi bawah seperti yang digambarkan pada Gambar 5.55.

Tegangan pada serat atas

$$\begin{aligned} -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \cdot e_s}{S_a} - \frac{M_{bs+}}{S_a} &= 0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} \\ -\frac{P_t}{0,6695} + \frac{P_t \cdot 0,4666}{0,2676} - \frac{1079,8460}{0,2676} &= 1440 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$P_t = 21912,4626 \text{ kN}$$

Tegangan pada serat bawah

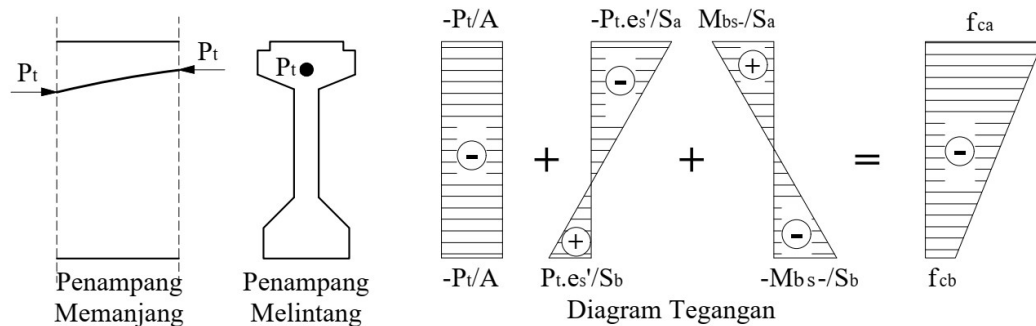
$$\begin{aligned} -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{bs+}}{S_b} &= 0,6 \cdot f'_{ci} \\ -\frac{P_t}{0,6695} - \frac{P_t \cdot 0,4666}{0,2895} + \frac{1079,8460}{0,2895} &= 19920 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$P_t = 7615,9421 \text{ kN}$$

b. Perhitungan tegangan di daerah tumpuan

Daerah tumpuan terletak pada jarak  $\frac{1}{4}$  bentang atau 7,5 m dari tumpuan tengah dengan momen negatif maksimum terjadi pada tumpuan tengah.

Diagram tegangan pada saat transfer di daerah tumpuan di potongan B dari Gambar 5.54 dapat dilihat pada Gambar 5.56.



**Gambar 5. 56 Diagram Tegangan saat Transfer di Daerah Tumpuan (Pot B pada Gambar 5.54)**

Eksentrisitas tendon tumpuan,

$$\begin{aligned}
 e_s' &= y_a - Z_0' \\
 &= 0,8834 - 0,2 \\
 &= 0,7334 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Gaya prategang dihitung dengan menggunakan persamaan tegangan beton di daerah tumpuan pada sisi atas dan sisi bawah seperti yang digambarkan pada Gambar 5.56.

Tegangan pada serat atas

$$\begin{aligned}
 -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s'}{S_a} + \frac{M_{bs-}}{S_a} &= 0,25 \cdot \sqrt{f_{ci}} \\
 -\frac{P_t}{0,6695} - \frac{P_t \cdot 0,7334}{0,2676} + \frac{1920,5723}{0,2676} &= 19920 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

$$P_t = 6399,4637 \text{ kN}$$

Tegangan pada serat bawah

$$\begin{aligned}
 -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \cdot e_s'}{S_b} - \frac{M_{bs-}}{S_b} &= 0,6 \cdot f_{ci} \\
 -\frac{P_t}{0,6695} + \frac{P_t \cdot 0,7334}{0,2895} - \frac{1920,5723}{0,2895} &= 1440 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

$$P_t = 7766,5952 \text{ kN}$$

Dari hasil perhitungan tegangan pada serat atas dan serat bawah di daerah lapangan dan daerah tumpuan, diambil gaya prategang terkecil.

$$P_t = 6399,4637 \text{ kN}$$

## 2. Jumlah Tendon dan Jumlah *Strands*

Jumlah tendon dan jumlah *strands* dihitung berdasarkan spesifikasi *strands* yang digunakan. Spesifikasi *strands* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.36.

**Tabel 5. 36 Data *Strands* Cable**

DATA STRANDS CABLE - STANDAR VSL			
Jenis <i>strands</i>	ASTM A-416 grade 270		
Tegangan leleh <i>strand</i>	$f_{py} =$	1675	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>	$A_{st} =$	98,7	mm <sup>2</sup>
Beban putus minimal satu <i>strands</i>	$P_{bs} =$	183,7	kN
Jumlah kawat untaian ( <i>strands cable</i> )		13	kawat untaian/tendon
Diameter selubung ideal		100	mm
Luas tampang tendon		1283,23	mm <sup>2</sup>
Beban putus satu tendon	$P_{bl} =$	2388,1	kN
Modulus elastis <i>strands</i>	$E_s =$	193000	MPa

(Sumber : vsl.com, 13 Maret 2018)

Data-data yang diperlukan dalam perhitungan jumlah tendon dan *strands* adalah sebagai berikut.

Gaya prategang awal,  $P_t = 6399,4637$  kN

Beban putus satu tendon,  $P_{bl} = 2388,1$  kN

Beban putus minimal satu *strands*,  $P_{bs} = 183,7$  kN

Jumlah tendon dan *strands* dihitung berdasarkan gaya prategang pada saat *jacking*. Gaya prategang saat *jacking* dihitung dengan persamaan berikut.

$$P_j = 0,8 \cdot P_{bl} \cdot n_t, \text{ maka } n_t = \frac{P_j}{0,8 \cdot P_{bl}}, \text{ dengan } P_j = \frac{P_t}{0,85}$$

Maka jumlah tendon yang diperlukan adalah,

$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,8 \cdot P_{bl}} = \frac{6399,4637}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 2388,1} = 3,71 \approx 4 \text{ tendon}$$

Jumlah *strands* yang diperlukan

$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,8 \cdot P_{bs}} = \frac{6399,4637}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 183,7} = 48,22 \approx 52 \text{ strands}$$

Tendon pada tengah bentang disusun seperti yang ditampilkan Tabel 5.37.

**Tabel 5. 37 Jumlah Strand dan Posisi Tendon di Lapangan**

Tendon baris ke-1	$nt1=$	3	Tendon	13	$strands/tendon =$	39	$strands$
Tendon baris ke-2	$nt2=$	1	Tendon	13	$strands/tendon =$	13	$strands$
	$nt =$	4	Tendon	Jumlah strands	$ns=$	52	$strands$

Persentase tegangan leleh pada saat *jacking* :

$$P_0 = \frac{P_t}{0,85 \cdot n_s \cdot P_{bs}} = \frac{6399,4637}{0,85 \cdot 52 \cdot 183,7} = 78,82\% < 85\% \quad \text{OK}$$

Gaya prategang yang terjadi akibat *jacking* :

$$P_j = P_0 \cdot (n_s \cdot P_{bs}) = 78,82\% \cdot (52 \cdot 183,7) = 7528,7808 \text{ kN}$$

Gaya prategang efektif,

Diperkirakan kehilangan gaya prategang = 32 %

$$P_{eff} = (100\% - 32\%) \cdot P_j = 68\% \cdot 7528,7808 = 5119,5709 \text{ kN}$$

Luas baja prategang yang dipakai,

$$A_p = n_s \cdot A_{st} = 52 \cdot 98,7 = 5132,92 \text{ mm}^2$$

Tegangan baja prategang saat *jacking*,

$$f_{pj} = \frac{P_j}{A_{ps}} = \frac{7528,7808 \cdot 1000}{5132,92} = 1466,7637 \text{ MPa}$$

Berdasarkan RSNIT-12-2004 pasal 4.4.3.2.2 tegangan ijin tarik baja prategang pada kondisi transfer tidak boleh melebihi nilai berikut.

$$f_{pj} = 1466,7637 \text{ MPa} < 0,94 \cdot f_{py} = 0,94 \cdot 1675 = 1574,5 \text{ MPa}$$

$$f_{pj} = 1466,7637 \text{ MPa} < 0,85 \cdot f_{pu} = 0,85 \cdot 1860 = 1581 \text{ MPa}$$

Tegangan baja prategang aman pada kondisi transfer karena tidak melebihi tegangan maksimum yang direkomendasikan oleh produsen baja prategang.

### 5.5.3 Tata Letak Tendon

Sebelum menentukan lintasan tendon, terlebih dahulu menentukan zona aman tendon untuk memastikan tendon berada pada posisi yang optimal.

#### 1. Zona Aman tendon

Zona aman tendon direncanakan dengan peninjauan momen pada tumpuan tengah, 3/4 bentang, 3/8 bentang dan ujung bentang balok prategang. Hasil



analisis momen dengan menggunakan SAP2000 v14 pada setiap titik yang ditinjau dapat dilihat pada Tabel 5.38.

**Tabel 5. 38 Momen di Titik yang Ditinjau pada Balok**

Beban			Momen			
			Tumpuan Tengah	3/4 bentang	3/8 bentang	Tumpuan Tepi
Beban	$Q$	$P$	kNm	kNm	kNm	kNm
Berat girder ( $bs$ )	17,0723		-1920,57	0,05	1079,85	0,00
Berat sendiri ( $MS$ )	29,8298		-3355,75	0,08	1886,78	0,00
B Mati tambahan ( $MA$ )	2,9415		-330,91	0,01	186,05	0,00
Beban lalu lintas ( $TD$ )	16,6500	126,91	-2586,91	-59,43	1499,31	0,00
$M_0 = M_{bs} + 50\% \cdot M_{MA}$			-2086,03	0,05	1172,87	0,00
$MT = M_{MS} + M_{MA} + M_{TD}$			-6273,56	-59,34	2765,21	0,00

Tendon pada balok prategang perlu ditempatkan pada posisi dimana tekanan yang terjadi pada balok tidak melebihi tekanan ijin saat transfer tetapi tetap dapat menahan beban yang direncanakan. Posisi dimana tendon dapat ditempatkan terletak di antara batas atas dan batas bawah tendon. Perhitungan batas atas dan batas bawah letak tendon adalah sebagai berikut.

a. Batas bawah letak tendon

Data yang diperlukan dalam proses perhitungan batas bawah letak tendon adalah sebagai berikut.

$$\text{Gaya prategang awal, } P_t = 6399,4637 \text{ kN}$$

$$\text{Luas penampang PCI, } A = 0,6695 \text{ m}^2$$

$$\text{Inersia PCI, } I_x = 0,2363 \text{ m}^4$$

$$\text{Titik berat PCI, } y_a = 0,8834 \text{ m}$$

$$y_b = 0,8166 \text{ m}$$

$$\text{Tegangan ijin tarik awal, } f_{ti} = 1440,4860 \text{ kPa}$$

Radius girasi

$$r^2 = \frac{I_x}{A} = \frac{0,2363}{0,6695} = 0,3531 \text{ m}^2$$

Batas *kern* bawah

$$k_b = \frac{r^2}{y_a} = \frac{0,3531}{0,8834} = 0,3997 \text{ m}$$

Perhitungan batas bawah pada tumpuan tengah adalah sebagai berikut

$$a_{min} = \frac{M_0}{P_t} = \frac{-2086,03}{6399,4637} = -0,3260 \text{ m}$$

$$e_b = a_{min} - k_b = -0,3260 - 0,3997 = -0,7257 \text{ m}$$

Pada desain gelagar ini, diijinkan tegangan tarik pada beton prategang, maka batas bawah dapat diperlebar. Pertambahan lebar dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$e_b' = \frac{f_{ti} \cdot k_b \cdot A}{P_t} = \frac{1440,4860 \cdot 0,3997 \cdot 0,6695}{6399,4637} = 0,0602 \text{ m}$$

$$e_{b \max} = e_b - e_b' = -0,7257 - 0,0602 = -0,7859 \text{ m}$$

Perhitungan batas bawah tendon pada bentang yang lain dilakukan dengan persamaan yang sama. Hasil perhitungan batas bawah tendon dapat dilihat pada Tabel 5.39.

**Tabel 5. 39 Batas Bawah Tendon**

Bagian	Panjang ( m )	$M_0$ ( kNm )	Tidak terjadi tarik		Terjadi tarik	
			$a_{min}$ ( m )	$e_b$ ( m )	$e_b'$ ( m )	$e_{b1}$ ( m )
Tumpuan Tengah	30	-2086,03	-0,3260	-0,7257	0,0602	-0,7859
3/4 bentang	22,5	0,05	0,0000	0,3997	0,0602	0,4600
3/8 bentang	11,25	1172,87	0,1833	0,5830	0,0602	0,6432
Ujung	0	0,00	0,0000	0,3997	0,0602	0,4600

b. Batas atas letak tendon

Data yang diperlukan dalam proses perhitungan batas bawah letak tendon adalah sebagai berikut.

Gaya prategang efektif,  $P_{eff} = 5119,5709 \text{ kN}$

Luas penampang komposit,  $A_c = 0,9323 \text{ m}^2$

Inersia komposit,  $I_c = 0,4198 \text{ m}^4$

Titik berat komposit,  $y_{a c} = 0,8062 \text{ m}$

$y_{b c} = 1,0938 \text{ m}$

Tegangan ijin tarik akhir,  $f_{ts} = 3221,0247 \text{ kPa}$

Radius girasi

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = \frac{0,4198}{0,9323} = 0,4503 \text{ m}^2$$

Batas *kern* atas

$$k_t = \frac{r^2}{y_{bc}} = \frac{0,4503}{1,0938} = 0,4117 \text{ m}$$

Perhitungan batas atas pada tumpuan tengah adalah sebagai berikut.

$$a_{max} = \frac{M_T}{P_{eff}} = \frac{-6273,5643}{5119,5709} = -1,2254 \text{ m}$$

$$e_t = a_{max} + k_t = -1,2254 + 0,4117 = -0,8137 \text{ m}$$

Pada desain gelagar ini, diijinkan tegangan tarik pada beton prategang, maka batas bawah dapat diperlebar. Pertambahan lebar dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$e_t' = \frac{f_t \cdot K_t \cdot A_c}{P_{eff}} = \frac{3221,0247 \cdot 0,4117 \cdot 0,9323}{5119,5709} = 0,2415 \text{ m}$$

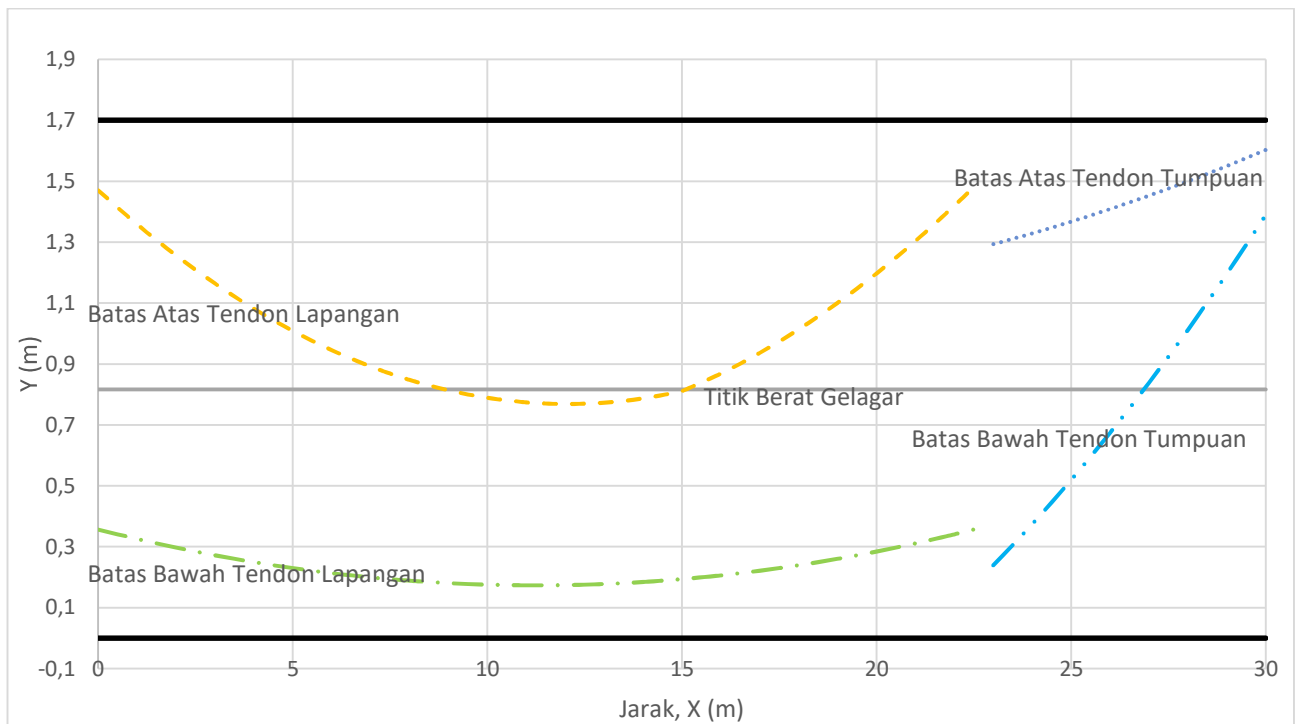
$$e_{t \max} = e_t + e_t' = -0,8137 + 0,2415 = -0,5723 \text{ m}$$

Perhitungan batas atas tendon pada bentang yang lain dilakukan dengan persamaan yang sama. Hasil perhitungan batas atas tendon dapat dilihat pada Tabel 5.40.

**Tabel 5. 40 Batas Atas Tendon**

Bagian	Panjang ( m )	$MT$ ( kNm )	Tidak terjadi tarik		Terjadi tarik	
			$a_{max}$ ( m )	$e_t$ ( m )	$e_t'$ ( m )	$e_{tI}$ ( m )
Tumpuan Tengah	30	-6273,5643	-1,2254	-0,8137	0,2415	-0,5723
3/4 bentang	22,5	-59,3386	-0,0116	-0,4233	0,2415	-0,6647
3/8 bentang	11,25	2765,2113	0,5401	0,1285	0,2415	-0,1130
Ujung	0	0,0000	0,0000	-0,4117	0,2415	-0,6531

Hasil perhitungan zona aman tendon yang ditampilkan pada Tabel 5.39 dan Tabel 5.40 digambarkan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.57 berikut.

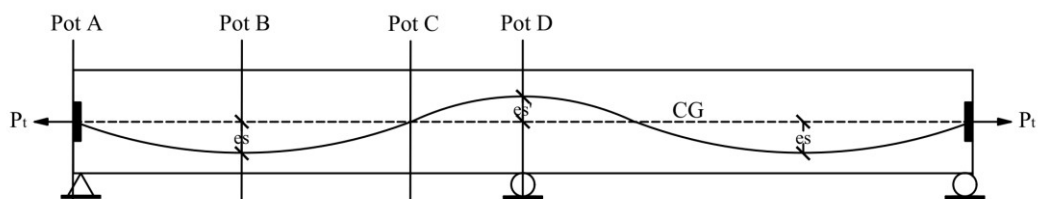


**Gambar 5. 57 Zona Aman Tendon**

Tendon harus ditempatkan di antara batas atas dan batas bawah seperti yang ditampilkan pada Gambar 5.57.

## 2. Tata Letak Posisi Tendon

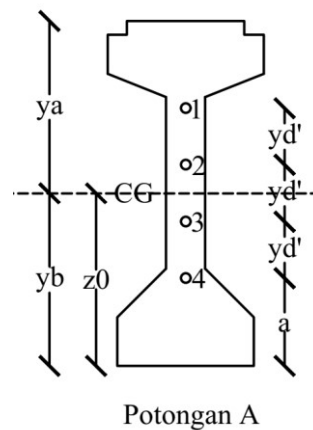
Tata letak posisi tendon direncanakan berdasarkan peninjauan pada tumpuan tepi (Pot A), 3/8 bentang (Pot B), 3/4 bentang (Pot C), dan tumpuan tengah (Pot D) seperti yang digambarkan pada Gambar 5.58.



**Gambar 5. 58 Penampang Memanjang Balok Prategang Menerus dengan Keterangan Potongan**

a. Posisi tendon di tumpuan tepi

Tumpuan tepi terletak pada Potongan A pada Gambar 5.58. Terdiri dari 4 baris tendon yang disusun secara vertikal, dimana pusat berat tendon berada di titik berat *PCI-Girder*, seperti yang digambarkan pada Gambar 5.59.



**Gambar 5. 59 Posisi Tendon di Tumpuan Tepi (Pot A pada Gambar 5.58)**

Posisi masing-masing tendon pada tumpuan dihitung dengan langkah sebagai berikut.

Ditetapkan jarak tendon baris ke-4 terhadap alas,  $a'=0,45$  m

Langkah selanjutnya adalah menentukan jarak antar as tendon ( $y'_d$ ) dengan cara menghitung momen statis tiap tiap tendon. Momen statis dihitung dengan cara mengalikan jumlah *strands* tiap tendon dengan jarak as tendon dengan as tendon terbawah.

Perhitungan statis momen tendon ditampilkan pada Tabel 5.41.

**Tabel 5. 41 Statis Momen Tendon di Tumpuan**

Baris Tendon	$n_i$	Jumlah Strands	Jarak As Tendon dengan As Tendon Terbawah	Statis Momen
		$n_{s i}$	$n_i y'_d$	$n_{s i} y'_d$
1	0	13	0	0
2	1	13	1 $y'_d$	13 $y'_d$
3	2	13	2 $y'_d$	26 $y'_d$
4	3	13	3 $y'_d$	39 $y'_d$
			$\Sigma(n_i y'_d) =$	78 $y'_d$

Jarak titik berat balok ke alas,  $y_b = 0,8166$  m

$$y_e = y_b - a' = 0,8166 - 0,45 = 0,3666 \text{ m}$$

Untuk menghitung jarak antar as tendon, digunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \sum(n_i \cdot y_{di}') &= n_s \cdot y_e \\ 78 \cdot y_d' &= 52 \cdot 0,3666 \\ y_d' &= \frac{52 \cdot 0,3666}{78} \\ y_d' &= 0,2444 \text{ m} \end{aligned}$$

Syarat jarak bersih antar *ducting* dari VSL adalah,

$$0,7 \cdot d_t = 0,7 \cdot 0,1 = 0,07 \text{ m}$$

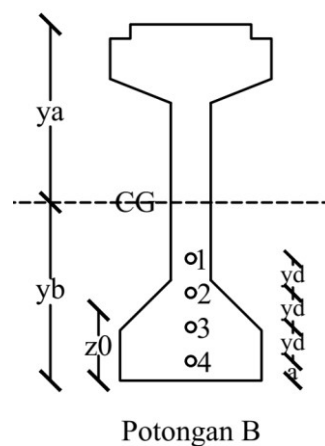
Jarak bersih antar selubung tendon,

$$y_d' - d_t = 0,2444 - 0,1 = 0,1444 \text{ m}$$

$$0,1444 \text{ m} > 0,07 \text{ m} \quad \text{OK}$$

b. Posisi tendon pada jarak 3/8 dari tepi

3/8 bentang terletak pada Potongan B pada Gambar 5.58. Terdiri dari 4 baris tendon yang disusun secara vertikal, dimana pusat berat tendon pada  $Z_0$ , seperti yang digambarkan pada Gambar 5.60.



**Gambar 5. 60 Posisi Tendon di Tumpuan (Pot B pada Gambar 5.58)**

Posisi masing-masing tendon pada tumpuan dihitung dengan langkah sebagai berikut.

Ditetapkan jarak tendon baris ke-4 terhadap alas,  $a' = 0,095$  m

Langkah selanjutnya adalah menentukan jarak antar as tendon ( $y'_d$ ) dengan cara menghitung momen statis tiap tendon. Momen statis dihitung dengan cara mengalikan jumlah *strands* tiap tendon dengan jarak as tendon dengan as tendon terbawah.

Perhitungan statis momen tendon ditampilkan pada Tabel 5.42.

**Tabel 5. 42 Statis Momen Tendon di Tumpuan**

Baris Tendon	$n_i$	Jumlah Strands	Jarak As Tendon dengan As Tendon Terbawah	Statis Momen
		$n_{si}$	$n_i y_d$	$n_{si} y_d$
1	0	13	0 $y_d$	0 $y_d$
2	1	13	1 $y_d$	13 $y_d$
3	2	13	2 $y_d$	26 $y_d$
4	3	13	3 $y_d$	39 $y_d$
			$\Sigma(n_i y'_d) =$	78 $y_d$

Jarak titik berat tendon ke alas,  $Z_0 = 0,35$  m

$$y_e = z_0 - a' = 0,35 - 0,095 = 0,2550 \text{ m}$$

Untuk menghitung jarak antar as tendon, digunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned} \Sigma(n_i y_{di}) &= n_s \cdot y_e \\ 78 \cdot y_d &= 52 \cdot 0,2550 \\ y_d &= \frac{52 \cdot 0,2550}{78} \\ y_d &= 0,17 \text{ m} \end{aligned}$$

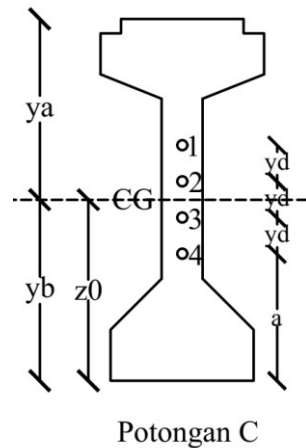
Jarak bersih antar selubung tendon,

$$y_d - d_t = 0,17 - 0,1 = 0,07 \text{ m}$$

$$0,07 \text{ m} = 0,07 \text{ m} \quad \text{OK}$$

c. Posisi tendon pada jarak  $\frac{3}{4}$  dari tepi

$\frac{3}{4}$  bentang terletak pada Potongan C pada Gambar 5.58. Terdiri dari 4 baris tendon yang disusun secara vertikal, dimana pusat berat tendon berada di titik berat *PCI-Girder*, seperti yang digambarkan pada Gambar 5.61.



**Gambar 5. 61 Posisi Tendon di  $\frac{3}{4}$  Bentang (Pot C pada Gambar 5.58)**

Posisi masing-masing tendon pada tumpuan dihitung dengan langkah sebagai berikut.

Ditetapkan jarak tendon baris ke-4 terhadap alas,  $a'=0,55$  m

Langkah selanjutnya adalah menentukan jarak antar as tendon ( $y_d'$ ) dengan cara menghitung momen statis tiap tiap tendon. Momen statis dihitung dengan cara mengalikan jumlah *strands* tiap tendon dengan jarak as tendon dengan as tendon terbawah.

Perhitungan statis momen tendon ditampilkan pada Tabel 5.43.

**Tabel 5. 43 Statis Momen Tendon di Tumpuan**

Baris Tendon	$n_i$	Jumlah Strands	Jarak As Tendon dengan As Tendon Terbawah	Statis Momen
		$n_{s i}$	$n_i \cdot y_d'$	$n_{s i} \cdot y_d'$
1	0	13	0	0
2	1	13	1	13
3	2	13	2	26
4	3	13	3	39
			$\Sigma(n_i \cdot y_d') =$	78

Jarak titik berat balok ke alas,  $y_b = 0,8166$  m

$y_e = y_b - a' = 0,8166 - 0,55 = 0,2666$  m



Untuk menghitung jarak antar as tendon, digunakan persamaan berikut.

$$\begin{aligned}\Sigma(n_i \cdot y_{di}') &= n_s \cdot y_e \\ 78 \cdot y_d' &= 52 \cdot 0,2666 \\ y_d' &= \frac{52 \cdot 0,2666}{78} \\ y_d' &= 0,1777 \text{ m}\end{aligned}$$

Jarak bersih antar selubung tendon,

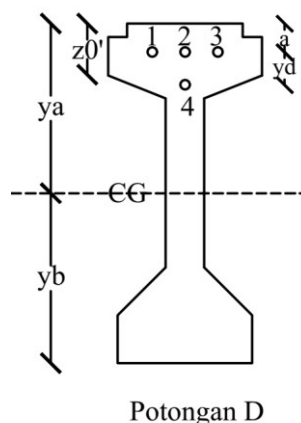
$$\begin{aligned}y_d' - d_t &= 0,1777 - 0,1 = 0,0777 \text{ m} \\ 0,0777 &> 0,07 \text{ m} \quad \text{OK}\end{aligned}$$

d. Posisi tendon di tumpuan tengah

Tumpuan tengah terletak pada Potongan D pada Gambar 5.58. Tendon di tengah bentang terdiri dari 2 baris tendon dimana baris ke-1 terdiri dari 3 buah tendon dan baris ke-2 terdiri dari 1 buah tendon seperti yang dapat dilihat pada Tabel 5.44 dan digambarkan pada Gambar 5.62.

**Tabel 5. 44 Jumlah *Strand* dan Posisi Tendon di Tengah Bentang**

Tendon baris ke-1	$nt1 =$	3	Tendon	13	$strands/tendon =$	39	$strands$
Tendon baris ke-2	$nt2 =$	1	Tendon	13	$strands/tendon =$	13	$strands$
	$nt =$	4	Tendon	Jumlah $strands$	$ns =$	52	$strands$



**Gambar 5. 62 Posisi Tendon di Tumpuan Tengah (Pot D pada Gambar 5.58)**

Ditetapkan jarak alas balok ke as baris tendon ke-1,  $a = 0,1$  m

Perhitungan selanjutnya adalah menentukan jarak vertikal antara tendon baris ke-1 dan ke-2 ( $y_d$ ), dimana data-data yang diperlukan dalam perhitungan adalah sebagai berikut.

Jarak titik berat tendon ke alas balok,  $z_0' = 0,15$  m

Jarak titik berat balok ke atas balok,  $y_a = 0,8834$  m

Eksentrisitas tendon tumpuan,  $e_s' = 0,7334$  m

Jumlah *strand* pada baris ke-1,  $n_1 = 39$  *strands*

Jumlah *strand* pada baris ke-2,  $n_2 = 13$  *strands*

Jumlah total *strand*,  $n_s = 52$  *strands*

Diameter selubung tendon,  $d_t = 0,1$  m

Jarak vertikal antara as ke as tendon ( $y_d$ ),

$$n_s \cdot Z_0 = n_1 \cdot a + n_2 \cdot (a + y_d)$$

Dari persamaan di atas, maka  $y_d$  dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$y_d = \frac{n_s \cdot Z_0 - n_1 \cdot a}{n_2} - a = \frac{52 \cdot 0,15 - 39 \cdot 0,1}{13} - 0,1 = 0,2 \text{ m}$$

Jarak bersih antar selubung tendon,

$$y_d - d_t = 0,2 - 0,1 = 0,1 \text{ m}$$

$$0,1 \text{ m} > 0,07 \text{ m} \text{ OK}$$

e. Eksentrisitas masing-masing tendon

Pada balok menerus terdapat momen positif di daerah lapangan dan momen negatif di tumpuan, sehingga tendon harus ditempatkan pada dua posisi. Tendon di tempatkan di bawah untuk menahan momen positif dan di atas untuk menahan momen negatif. Titik yang dijadikan acuan dalam menentukan posisi tendon adalah pada tumpuan tepi ( $X=0$  m), 3/8 bentang ( $X=11,25$ ), 3/4 bentang ( $X=22,5$  m), dan tumpuan tengah ( $X=30$  m).

1) Letak tendon pada bentang  $X=0$  m

Pada bentang  $X=0$  m, jarak dari alas ke baris tendon ke-4 adalah,  $a'=0,35$  m.

$$\text{Tendon 1} : Z_1' = a' + 3 \cdot y_d' = 0,45 + 3 \cdot 0,2444 = 1,1832 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 2} : Z_2' = a' + 2 \cdot y_d' = 0,45 + 2 \cdot 0,2444 = 0,9388 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 3} : Z_3' = a' + 1 \cdot y_d' = 0,45 + 1 \cdot 0,2444 = 0,6944 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 4} : Z_4' = a' + 0 \cdot y_d' = 0,45 + 0 \cdot 0,2444 = 0,45 \text{ m}$$

2) Letak tendon pada bentang  $X=11,25$  m

Pada bentang  $X=11,25$  m, jarak dari alas ke baris tendon ke-4 adalah,  $a'=0,35$  m.

$$\text{Tendon 1} : Z_1 = a + 3 \cdot y_d = 0,095 + 3 \cdot 0,17 = 0,605 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 2} : Z_2 = a + 2 \cdot y_d = 0,095 + 2 \cdot 0,17 = 0,435 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 3} : Z_3 = a + 1 \cdot y_d = 0,095 + 1 \cdot 0,17 = 0,265 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 4} : Z_4 = a + 0 \cdot y_d = 0,095 + 0 \cdot 0,17 = 0,095 \text{ m}$$

3) Letak tendon pada bentang  $X=22,5$  m

Pada bentang  $X=22,5$  m, jarak dari alas ke baris tendon ke-4 adalah,  $a'=0,35$  m.

$$\text{Tendon 1} : Z_1' = a' + 3 \cdot y_d' = 0,55 + 3 \cdot 0,1777 = 1,0832 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 2} : Z_2' = a' + 2 \cdot y_d' = 0,55 + 2 \cdot 0,1777 = 0,9055 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 3} : Z_3' = a' + 1 \cdot y_d' = 0,55 + 1 \cdot 0,1777 = 0,7277 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 4} : Z_4' = a' + 0 \cdot y_d' = 0,55 + 0 \cdot 0,1777 = 0,55 \text{ m}$$

4) Letak tendon pada bentang  $X=30$  m

Pada daerah lapangan, jarak dari alas ke baris tendon ke-2 adalah,  $a=0,35$  m.

$$\text{Tendon 1} : Z_1 = H - a = 1,7 - 0,10 = 1,6 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 2} : Z_2 = H - a = 1,7 - 0,10 = 1,6 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 3} : Z_3 = H - a = 1,7 - 0,10 = 1,6 \text{ m}$$

$$\text{Tendon 4} : Z_4 = H - a - y_d = 1,7 - 0,10 - 0,2 = 1,4 \text{ m}$$

Eksentrisitas dalam perhitungan tata letak tendon merupakan jarak vertikal tendon di tumpuan dan di lapangan. Karena ada 4 posisi tendon yang ditinjau pada poin 1-4, maka terdapat 3 eksentrisitas tendon. Eksentrisitas masing-masing tendon dihitung sebagai berikut.

5) Eksentrisitas pada bentang  $X=11,25$  m

Berikut ini adalah perhitungan eksentrisitas tendon dari bentang  $X=0$  m sampai  $X=11,25$  m.

Tendon 1	: $Z_1'-Z_1$	=1,1832 -0,605	=0,5782 m
Tendon 2	: $Z_2'-Z_2$	=0,9388-0,435	=0,5038 m
Tendon 3	: $Z_3'-Z_3$	=0,6944-0,265	=0,4294 m
Tendon 4	: $Z_4'-Z_4$	=0,45-0,095	=0,3550 m

6) Eksentrisitas pada bentang  $X=22,5$  m

Berikut ini adalah perhitungan eksentrisitas tendon dari bentang  $X=11,25$  m sampai  $X=22,5$  m.

Tendon 1	: $Z_1'-Z_1$	=1,0832 -0,605	=0,4782 m
Tendon 2	: $Z_2'-Z_2$	=0,9055-0,435	=0,4705 m
Tendon 3	: $Z_3'-Z_3$	=0,7277-0,265	=0,4627 m
Tendon 4	: $Z_4'-Z_4$	=0,55-0,095	=0,4550 m

7) Eksentrisitas pada bentang  $X=30$  m

Berikut ini adalah perhitungan eksentrisitas tendon dari bentang  $X=22,5$  m sampai  $X=30$  m.

Tendon 1	: $Z_1'-Z_1$	=1,6 -1,0832	=0,5168 m
Tendon 2	: $Z_2'-Z_2$	=1,6-0,9055	=0,6945 m
Tendon 3	: $Z_3'-Z_3$	=1,6-0,7277	=0,8723 m
Tendon 4	: $Z_4'-Z_4$	=1,4-0,55	=0,85 m

## f. Lintasan inti tendon

Lintasan inti tendon dihitung dengan persamaan berikut.

Tendon lapangan,  $Y = -\frac{16}{9} \cdot \frac{f}{L^2} \cdot (3 \cdot L \cdot X - 4 \cdot X^2)$ , dengan  $f = e_s$

Tendon tumpuan,  $Y = 16 \cdot f' \cdot \frac{(X - \frac{3}{4}L)}{L^2} \cdot (\frac{5}{4} \cdot L - X)$ , dengan  $f' = e_s'$

Panjang bentang balok,  $L = 30$  m

Eksentrisitas tendon lapangan,  $f = e_s = 0,4666$  m

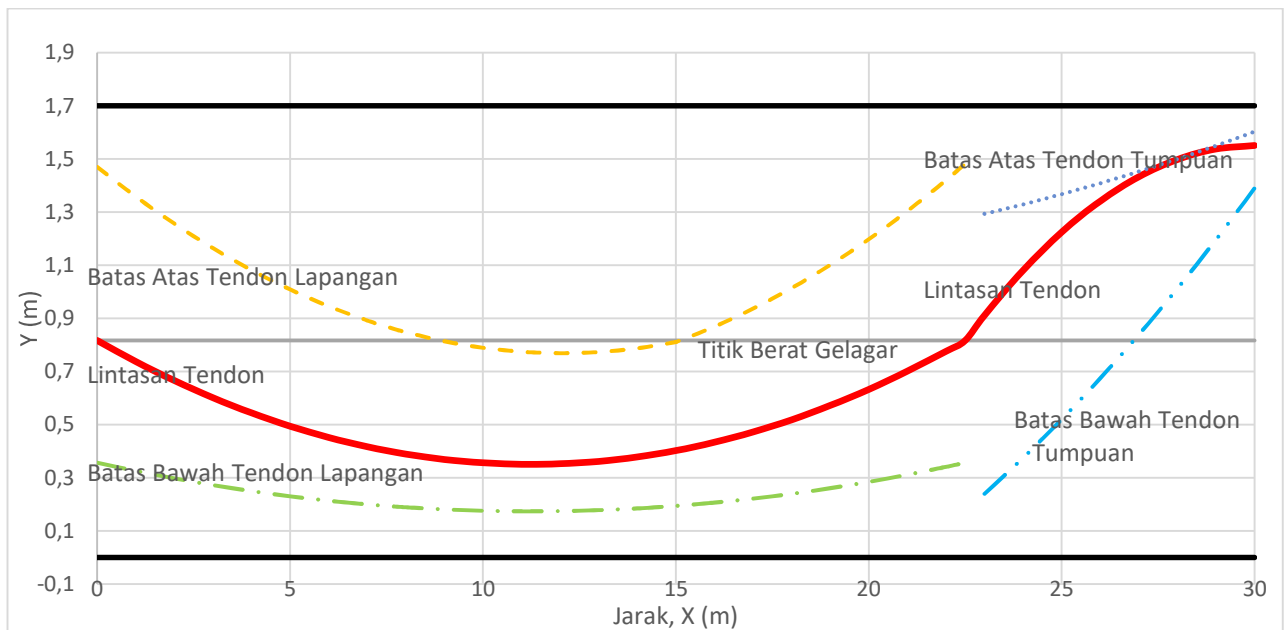
Eksentrisitas tendon tumpuan,  $f' = e_s' = 0,7333$  m

Dengan  $X$  adalah jarak titik yang ditinjau ke tumpuan.

Hasil perhitungan lintasan tendon dapat dilihat pada Tabel 5.45 dan digambarkan dalam bentuk grafik yang dapat dilihat pada Gambar 5.63.

**Tabel 5. 45 Lintasan Inti Tendon**

Jarak	Eksentrisitas Tendon	Jarak	Eksentrisitas Tendon	Jarak	Eksentrisitas Tendon
$X$	$Y$	$X$	$Y$	$X$	$Y$
( m )	( m )	( m )	( m )	( m )	( m )
0	0,0000	11	-0,4664	21	-0,1161
1	-0,0793	11,25	-0,4666	22	-0,0406
2	-0,1512	12	-0,4645	22,5	0,0000
3	-0,2157	13	-0,4553	23	0,0945
4	-0,2728	14	-0,4387	24	0,2640
5	-0,3226	15	-0,4147	25	0,4074
6	-0,3650	16	-0,3834	26	0,5248
7	-0,4000	17	-0,3447	27	0,6161
8	-0,4277	18	-0,2986	28	0,6813
9	-0,4479	19	-0,2452	29	0,7204
10	-0,4608	20	-0,1843	30	0,7334



**Gambar 5. 63 Zona Aman Tendon dan Lintasan Tendon**

Berdasarkan Gambar 5.63, tendon berada di antara batas atas dan batas bawah zona aman tendon, maka penempatan tendon pada balok prategang menerus sudah tepat.

g. Tata letak tendon

Berikut ini adalah data-data yang diperlukan dalam perhitungan lintasan masing-masing tendon.

Panjang bentang jembatan,  $L = 30$  m

Titik berat balok terhadap alas,  $y_b = 0,8166$  m

Eksentrisitas tendon lapangan,  $f=e_s = 0,4666$  m

Eksentrisitas tendon tumpuan,  $f'=e_s' = 0,7334$  m

Berdasarkan perhitungan sebelumnya, diperoleh posisi tiap tendon dan eksentrisitas masing-masing tendon yang dapat dilihat pada Tabel 5.46.

**Tabel 5. 46 Posisi tiap Tendon dan Eksentrisitas Masing-Masing Tendon**

Bentang	No Tendon	$z_i'$	$z_i$	$f_i$
Bentang 0 – 11,25 m	$z1$	1,1832	0,605	0,5782
	$z2$	0,9388	0,435	0,5038
	$z3$	0,6944	0,265	0,4294
	$z4$	0,4500	0,095	0,3550
Bentang 11,25 – 22,5 m	$z1$	0,6050	1,0832	0,4782
	$z2$	0,4350	0,9055	0,4705
	$z3$	0,2650	0,7277	0,4627
	$z4$	0,0950	0,5500	0,4550
Bentang 22,5 – 30 m	$z1$	1,0832	1,6000	0,5168
	$z2$	0,9055	1,6000	0,6945
	$z3$	0,7277	1,6000	0,8723
	$z4$	0,5500	1,4000	0,8500

Persamaan lintasan tendon yang digunakan adalah sebagai berikut.

$$\text{Tendon lapangan, } Y = -\frac{16}{9} \cdot \frac{f}{L^2} \cdot (3 \cdot L \cdot X - 4 \cdot X^2)$$

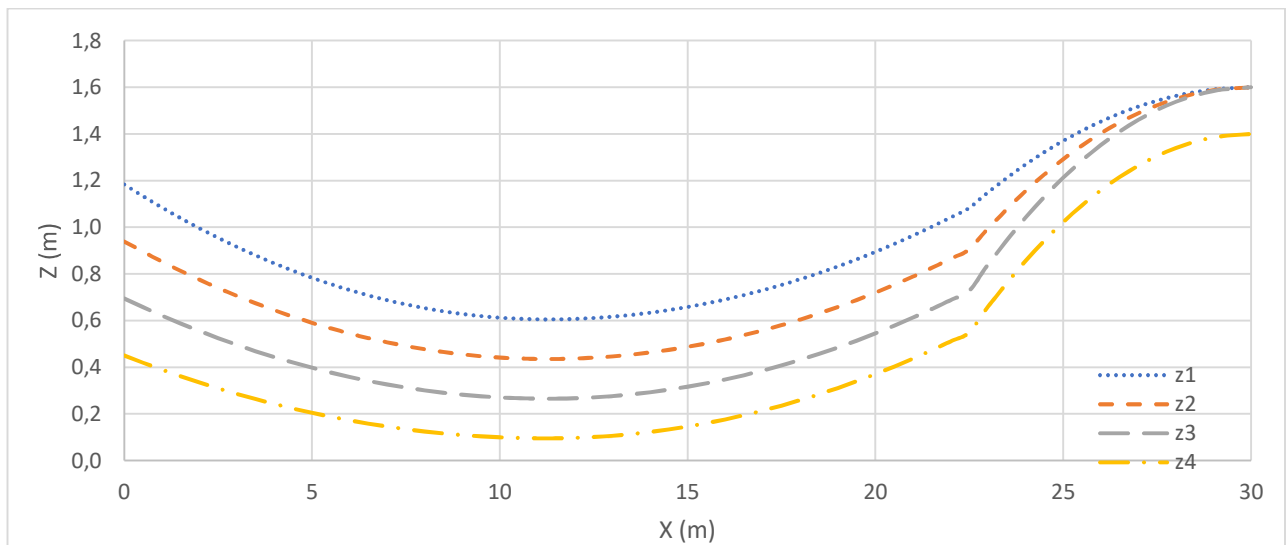
$$\text{Tendon Tumpuan, } Y = 16 \cdot f \cdot \frac{\left(\frac{X^3}{4} - L\right)}{L^2} \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot L - X\right)$$

Lintasan masing-masing tendon dihitung dengan persamaan tersebut dengan data sesuai dengan Tabel 5.46. Hasil perhitungan numerik lintasan masing-masing tendon dapat dilihat pada Tabel 5.47 dan ditampilkan secara grafis pada Gambar 5.64.

**Tabel 5. 47 Lintasan Masing-Masing Tendon**

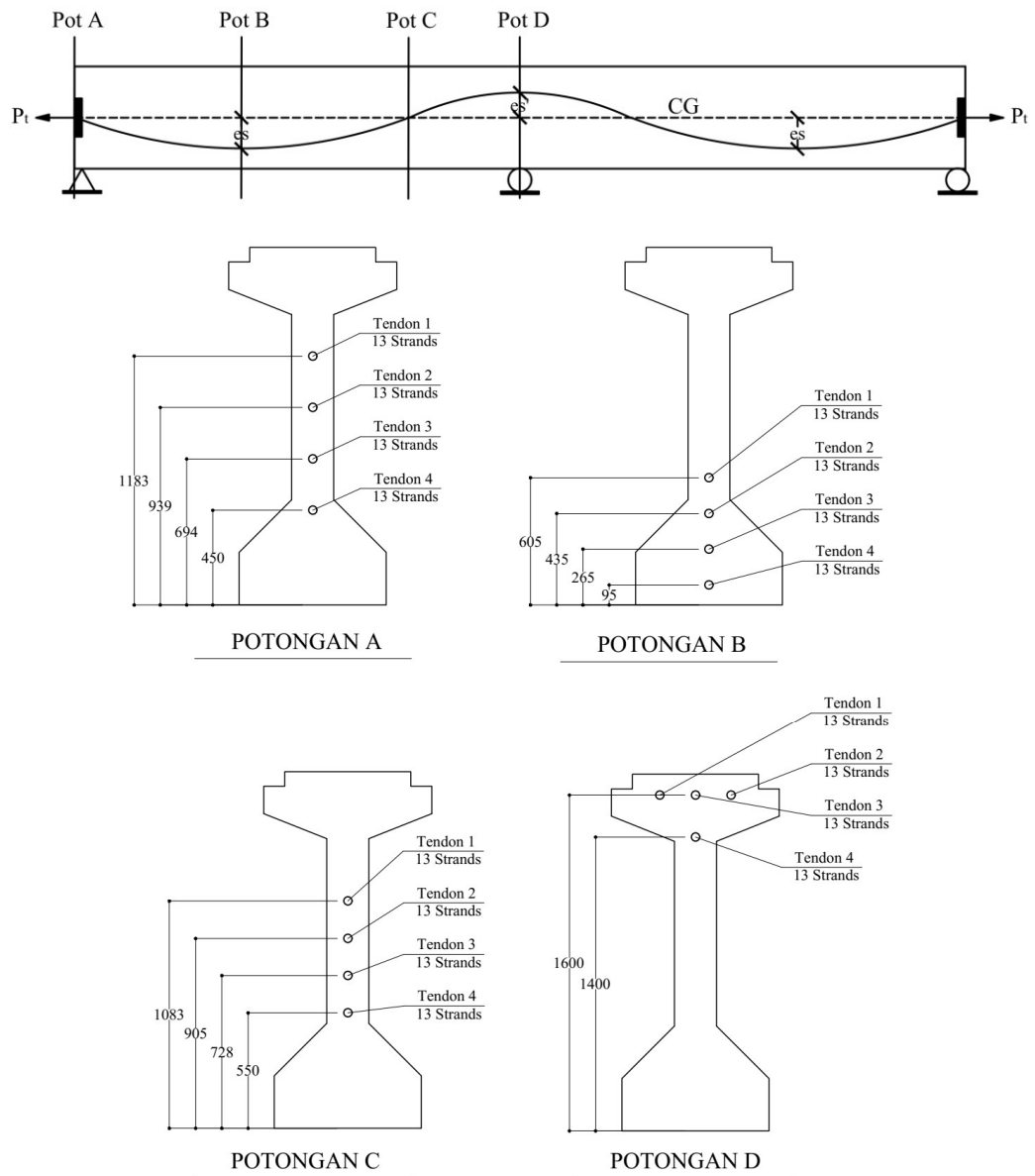
Jarak	Inti Tendon	Posisi Tendon			
		Tendon 1	Tendon 2	Tendon 3	Tendon 4
$X$	$Z$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0	0,8166	1,1832	0,9388	0,6944	0,4500
1	0,7373	1,0850	0,8532	0,6215	0,3897
2	0,6654	0,9959	0,7756	0,5553	0,3350
3	0,6009	0,9159	0,7059	0,4959	0,2859
4	0,5438	0,8451	0,6442	0,4433	0,2424
5	0,4940	0,7835	0,5905	0,3975	0,2046
6	0,4516	0,7309	0,5447	0,3585	0,1723
7	0,4166	0,6875	0,5069	0,3263	0,1457
8	0,3889	0,6533	0,4770	0,3008	0,1246
9	0,3687	0,6281	0,4552	0,2822	0,1092
10	0,3558	0,6121	0,4412	0,2703	0,0994
11	0,3502	0,6053	0,4352	0,2652	0,0952
11,25	0,3500	0,6050	0,4350	0,2650	0,0950
12	0,3521	0,6071	0,4371	0,2671	0,0970
13	0,3613	0,6166	0,4464	0,2762	0,1060
14	0,3779	0,6336	0,4631	0,2926	0,1222
15	0,4018	0,6581	0,4873	0,3164	0,1456
16	0,4332	0,6902	0,5189	0,3475	0,1761
17	0,4719	0,7299	0,5579	0,3859	0,2139
18	0,5180	0,7771	0,6044	0,4316	0,2588
19	0,5714	0,8319	0,6583	0,4846	0,3109
20	0,6323	0,8943	0,7196	0,5449	0,3702
21	0,7005	0,9642	0,7884	0,6126	0,4368
22	0,7760	1,0416	0,8646	0,6875	0,5105
22,5	0,8166	1,0832	0,9055	0,7277	0,5500
23	0,9111	1,1498	0,9950	0,8402	0,6596
24	1,0806	1,2692	1,1555	1,0417	0,8560
25	1,2240	1,3703	1,2913	1,2123	1,0222
26	1,3414	1,4530	1,4024	1,3519	1,1582
27	1,4327	1,5173	1,4889	1,4604	1,2640
28	1,4978	1,5632	1,5506	1,5380	1,3396
29	1,5370	1,5908	1,5877	1,5845	1,3849
30	1,5500	1,6000	1,6000	1,6000	1,4000





**Gambar 5. 64 Grafik Lintasan Tendon Balok Menerus**

Gambar penampang melintang *PCI-Girder* dengan detail posisi tendon pada tumpuan tepi (Potongan A) , 3/8 bentang (Potongan B), 3/4 bentang (Potongan C) dan tumpuan tengah (Potongan D) dari penampang memanjang dapat dilihat pada Gambar 5.65.



**Gambar 5. 65 Penampang Melintang dengan Detail Posisi Tendon pada Balok Menerus**

#### 5.5.4 Kehilangan Gaya Prategang (*Loss of Prestress*)

Kehilangan gaya prategang (*Loss of Prestress*) dikelompokkan menjadi 2 yaitu kehilangan gaya prategang jangka pendek dan kehilangan gaya prategang jangka panjang.

##### 1. Kehilangan gaya prategang jangka pendek

Kehilangan gaya prategang jangka pendek terjadi pada saat proses transfer gaya prategang, dan terjadi pada waktu singkat. Kehilangan gaya prategang jangka pendek meliputi perpendekan elastis beton, dudukan angkur, dan friksi.

##### a. Kehilangan prategang karena dudukan angkur

Saat gaya prategang disalurkan ke angkur, angkur tertarik masuk berkisar antara 2-7mm.

$$\begin{aligned} \text{Pergeseran angkur} \quad \Delta_A &= 2 \text{ mm} \\ &= 0,002 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Modulus elastisitas baja prategang} \quad E_{ps} = 193000 \text{ MPa}$$

$$\text{Panjang tendon} \quad L = 30 \text{ m}$$

Kehilangan prategang akibat pergeseran angkur dihitung dengan persamaan berikut.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta_A}{L} \cdot E_{ps} = \frac{0,002}{30} \cdot 193000 = 12,8667 \text{ MPa}$$

##### b. Kehilangan tegangan akibat friksi/gesekan tendon

Metode penarikan baja prategang yang digunakan adalah pascatarik dengan penarikan dilakukan pada dua sisi gelagar. Data yang diperlukan dalam perhitungan kehilangan tegangan akibat gesekan tendon adalah sebagai berikut.

$$\text{Eksentrisitas tendon lapangan, } e_s = y = 0,4666 \text{ m}$$

$$\text{Panjang tendon lapangan, } L = x = 22,5 \text{ m}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon tumpuan, } e_s' = y' = 0,7334 \text{ m}$$

$$\text{Panjang tendon tumpuan, } L = x' = 15 \text{ m}$$

$$\text{Tegangan baja prategang saat } jacking, f_1 = f_{pj} = 1466,7637 \text{ MPa}$$

$$\text{Koefisien } Wobble, \quad K = 0,002$$

$$\text{Koefisien kelengkungan, } \mu = 0,2$$

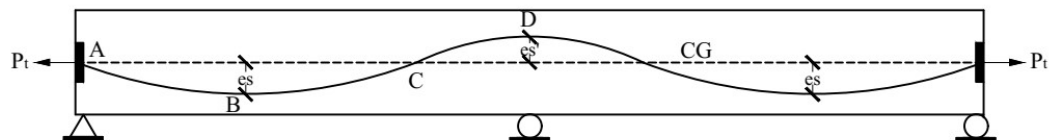
Sudut tendon lapangan,

$$\alpha = \frac{\delta y}{x} = \frac{8 \cdot 0,4666}{22,5} = 0,1659 \text{ radian}$$

Sudut tendon tumpuan,

$$\alpha = \frac{\delta y}{x} = \frac{8 \cdot 0,7334}{15} = 0,3912 \text{ radian}$$

Proses perhitungan dilakukan dalam 2 segmen, yaitu pada tendon lapangan dan tendon tumpuan. Segmen ABC adalah bentang 0 m sampai  $\frac{3}{4}$  bentang atau 22,5 m, sedangkan segmen CDE merupakan bentang 22,5 sampai 30 m. Detail pembagian segmen dapat dilihat pada Gambar 5.66. Perhitungan kehilangan tegangan akibat gesekan tendon dapat dilihat pada Tabel 5.48.



**Gambar 5. 66 Pembagian Segmen untuk Perhitungan Kehilangan Tegangan Akibat Gesekan Tendon**

Tabel 5. 48 Tabel Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Akibat Friksi

Segmen	$L$	$KL$	$\alpha$	$\mu\alpha$	$KL+\mu\alpha$	$e^{KL+\mu\alpha}$	Tegangan Akhir Segmen	Tegangan	Lost of prestress
ABC	22,5	0,0450	0,1659	0,0332	0,0782	0,9248	0,9248 F1	1356,4602	110,3035
CD	7,5	0,0150	0,3912	0,0782	0,0932	0,9110	0,8425 F1	1235,7133	231,0504

Kehilangan gaya prategang akibat friksi,

$$\Delta f_{pF} = 231,0504 \text{ MPa}$$

c. Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton

Transfer gaya prategang dilakukan dalam 2 tahap, dimana dalam satu tahap transfer, dua tendon ditarik secara bersamaan. Data yang diperlukan dalam perhitungan ini adalah sebagai berikut.

Luas penampang PCI,  $A = 0,6695 \text{ m}^2$

Eksentrisitas tendon lapangan,  $e_s = 0,4666 \text{ m}$

Eksentrisitas tendon tumpuan,  $e_s' = 0,7334 \text{ m}$

Momen inersia tampang *PCI-Girder*,  $I_x = 0,2364 \text{ m}^4$

Berat jenis beton prategang,  $w_c = 25,5 \text{ kN/m}^3$

Kuat tekan beton prategang,  $f'_c = 41,5 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas beton prategang pada saat transfer.

Kuat tekan beton prategang saat transfer,  $f'_{ci} = 33,2 \text{ MPa}$

$$\begin{aligned} E_{ci} &= 0,043 \cdot W_c^{1,5} \cdot \sqrt{f'_{ci}} \\ &= 0,043 \cdot 25,5^{1,5} \cdot \sqrt{33,2} \\ &= 31904,1933 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Modulus elastisitas baja prategang,  $E_s = 193000 \text{ MPa}$

Jumlah total *strands*,  $n_s = 52 \text{ strands}$

Luas tampang tendon prategang,  $A_{ps} = 5132,92 \text{ mm}^2$

Panjang tendon lapangan,  $L_{tL} = 22,5 \text{ m}$

Panjang tendon tumpuan,  $L_{tT} = 7,5 \text{ m}$

Momen positif akibat berat sendiri PCI,  $M_{bs+} = 1079,8460 \text{ kNm}$

Momen negatif akibat berat sendiri PCI,  $M_{bs-} = 1920,5723 \text{ kNm}$

Rasio modulus antara baja prategang dengan *PCI-Girder*,

$$n = \frac{E_s}{E_{ci}} = \frac{193000}{31904,1933} = 6,0494$$

Tegangan baja prategang setelah dikurangi kehilangan tegangan akibat pengangkutan dan gesekan.

$$\begin{aligned} f_{pi} &= f_{pj} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pF} \\ &= 1466,7637 - 12,8667 - 231,0504 \\ &= 1222,8466 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Gaya prategang setelah kehilangan gaya prategang akibat pengangkutan dan gesekan

$$\begin{aligned} P_i &= f_{pi} \cdot A_{ps} \\ &= 231,0504 \cdot 5132,92 \cdot 10^{-3} \\ &= 6276,7738 \text{ kN} \end{aligned}$$

Pada balok menerus posisi tendon di tempatkan di bagian bawah balok pada daerah lapangan untuk menahan momen positif dan ditempatkan di bagian atas balok pada daerah tumpuan untuk menahan momen negatif. Karena

memiliki eksentrisitas dan arah momen yang berbeda maka, tegangan beton yang terjadi pada titik berat tendon berbeda antara daerah lapangan dan daerah tumpuan. Keduanya harus dihitung, kemudian dirata-rata. Perhitungan tegangan beton di pusat berat tendon adalah sebagai berikut.

Tegangan beton di pusat berat tendon lapangan saat transfer,

$$\begin{aligned} f_{csL} &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_x} + \frac{M_{bs} \cdot e_s}{I_x} \\ &= -\frac{6276,7738}{0,6695} - \frac{6276,7738 \cdot 0,4666^2}{0,2364} + \frac{1079,8460 \cdot 0,4666}{0,2364} \\ &= 13024,2890 \text{ kPa} = 13,0243 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan beton di pusat berat tendon tumpuan saat transfer,

$$\begin{aligned} f_{csT} &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_x} + \frac{M_{bs} \cdot e_s}{I_x} \\ &= -\frac{6276,7738}{0,6695} - \frac{6276,7738 \cdot 0,7334^2}{0,2364} + \frac{1920,5723 \cdot 0,7334}{0,2364} \\ &= 17698,2582 \text{ kPa} = 17,6983 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Regangan beton di lapangan,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cL} &= \frac{f_{csL}}{E_{ci}} \\ &= \frac{13,0243}{31904,1933} \\ &= 0,000498 \end{aligned}$$

Pemendekan beton di lapangan,

$$\begin{aligned} \Delta L_L &= L \cdot \varepsilon_{cL} \\ &= 22,5 \cdot 0,000498 \\ &= 0,009185 \text{ m} \end{aligned}$$

Regangan beton di tumpuan,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cT} &= \frac{f_{csT}}{E_{ci}} \\ &= \frac{17,6983}{31904,1933} \\ &= 0,000555 \end{aligned}$$

Pemendekan beton di tumpuan,

$$\begin{aligned}\Delta L_T &= L \cdot \varepsilon c_T \\ &= 7,5 \cdot 0,000555 \\ &= 0,00416 \text{ m}\end{aligned}$$

Pemendekan beton total,

$$\begin{aligned}\Delta L &= \Delta L_L + \Delta L_T \\ &= 0,009185 + 0,00416 \\ &= 0,0133 \text{ m}\end{aligned}$$

Regangan total

$$\begin{aligned}\varepsilon c &= \frac{\Delta L}{L} \\ &= \frac{0,0133}{30} \\ &= 0,000445\end{aligned}$$

Tendon dan balok dianggap memiliki panjang yang sama, sehingga regangan yang terjadi pada tendon juga memiliki nilai yang sama. Sehingga kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis beton dapat dihitung dengan persamaan berikut,

$$\begin{aligned}f_{cs} &= \varepsilon c \cdot E_s \\ &= 0,000445 \cdot 193000 \\ &= 85,8573 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Gelagar pada Jembatan Sambiroto menggunakan 4 buah tendon yang ditarik dalam 2 tahap, dengan 2 tendon di tarik sekaligus. Maka kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis beton adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta f_{pES} &= \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j \\ &= \frac{1}{2} \cdot 85,8573 \\ &= 42,9286 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Tegangan baja prategang setelah transfer.

$$\begin{aligned}f_{ps} &= f_{pj} - (\Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES}) \\ &= 1466,7637 - (12,8667 + 231,0504 + 42,9286) \\ &= 1179,9180 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Gaya prategang setelah transfer,

$$\begin{aligned} P_i &= A_{ps} \cdot f_{ps} \\ &= 5132,92 \cdot 1179,9180 \cdot 10^{-3} \\ &= 6056,4246 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 2. Kehilangan Gaya Prategang Jangka Panjang

Kehilangan gaya prategang jangka Panjang terjadi akibat rangkai, susut dan relaksasi tendon. Kehilangan gaya prategang jangka Panjang dihitung sebagai berikut.

### a. Kehilangan tegangan akibat pengaruh rangkai (*creep*)

Nilai  $K_{CR}$  ditentukan dari sistem penarikan baja prategang yang digunakan. Pada Jembatan Sambiroto, sistem penarikan baja prategang menggunakan sistem pascatarik sehingga nilai  $K_{CR}$  adalah sebagai berikut.

$$K_{CR} = 1,6$$

Modulus elastisitas tendon,	$E_s$	=193000 MPa
Modulus elastisitas beton prategang,	$E_c$	=35669,973 MPa
Gaya prategang setelah transfer,	$P_i$	=6056,4246 MPa
Luas penampang PCI,	$A_c$	=0,9323 m <sup>2</sup>
Momen inersia PCI,	$I_{xc}$	=0,4198 m <sup>4</sup>
Eksentrisitas tendon lapangan,	$e_s$	=0,7438 m
Eksentrisitas tendon tumpuan,	$e_s'$	=0,4562 m
Momen positif akibat berat sendiri PCI,	$M_{bs+}$	=1079,8460 kNm
Momen negatif akibat berat sendiri PCI,	$M_{bs-}$	=1920,5723 kNm

Rasio modulus antara baja prategang dengan *PCI-Girder*,

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{193000}{35669,973} = 5,41$$

Seperti pada perhitungan kehilangan gaya prategang akibat perpindahan elastis beton, tegangan beton pada pusat berat tendon dihitung pada daerah lapangan dan daerah tumpuan. Tegangan beton pada pusat berat tendon dihitung dengan persamaan berikut.



Tegangan beton di pusat berat tendon lapangan,

$$\begin{aligned} f_{csL} &= -\frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_c} + \frac{M_{bs+} \cdot e_s}{I_c} \\ &= -\frac{6056,4246}{0,9323} - \frac{6056,4246 \cdot 0,7438^2}{0,4198} + \frac{1079,8460 \cdot 0,7438}{0,4198} \\ &= -12564,49 \text{ kPa} = -12,5645 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan beton di pusat berat tendon tumpuan,

$$\begin{aligned} f_{csT} &= -\frac{P_i}{A_c} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_c} + \frac{M_{bs-} \cdot e_s'}{I_c} \\ &= -\frac{6056,4246}{0,9323} - \frac{6056,4246 \cdot 0,4562^2}{0,4198} + \frac{1920,5723 \cdot 0,4562}{0,4198} \\ &= -7412,135 \text{ kPa} = -7,4121 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan beton akibat beban mati tambahan dihitung dengan momen positif pada daerah lapangan dan menggunakan momen negatif pada daerah tumpuan. Perhitungan tegangan beton di pusat berat tendon akibat beban mati tambahan adalah sebagai berikut.

Momen positif akibat beban mati tambahan,  $M_{MA+} = 186,0539 \text{ kNm}$

Tegangan beton di pusat berat tendon lapangan akibat beban mati tambahan,

$$\begin{aligned} f_{csdL} &= \frac{M_{(MA+)} \cdot e_s}{I_c} \\ &= \frac{186,0539 \cdot 0,7438}{0,4198} \\ &= 329,6528 \text{ kPa} = 0,3297 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Momen negatif akibat beban mati tambahan,  $M_{MA-} = 330,9082 \text{ kNm}$

Tegangan beton di pusat berat tendon tumpuan akibat beban mati tambahan,

$$\begin{aligned} f_{csdT} &= \frac{M_{(MA-)} \cdot e_s'}{I_c} \\ &= \frac{330,9082 \cdot 0,4562}{0,4198} \\ &= 359,6386 \text{ kPa} = 0,3596 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kehilangan tegangan akibat pengaruh rangkai di lapangan,

$$\begin{aligned} \Delta f_{pCR L} &= n \cdot K_{CR} \cdot (f_{csL} - f_{csdL}) \\ &= 5,41 \cdot 1,6 \cdot (12,5645 - 0,3297) \\ &= 105,9187 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kehilangan tegangan akibat pengaruh rangkai di tumpuan,

$$\begin{aligned}\Delta f_{pCR T} &= n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs T} - f_{csd T}) \\ &= 5,41 \cdot 1,6 \cdot (7,4121 - 0,3596) \\ &= 61,0545 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Kehilangan tegangan akibat pengaruh rangkai rata-rata,

$$\begin{aligned}\Delta f_{pCR} &= \frac{\Delta f_{pCRL} \cdot L_L + \Delta f_{pCR T} \cdot L_T}{L_T} \\ &= \frac{105,9187 \cdot 22,5 + 61,0545 \cdot 7,5}{30} \\ &= 94,7027 \text{ MPa}\end{aligned}$$

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

Metode perawatan yang digunakan adalah perawatan basah 7 hari.

$$t = 30 \text{ hari}$$

$$E_{ps} = 193000 \text{ MPa}$$

$$\text{Regangan susut ultimit, } (\epsilon_{SH})_u = 0,00082$$

Regangan susut dengan perawatan basah,

$$\begin{aligned}(\epsilon_{SH})_t &= \frac{t}{35+t} \cdot (\epsilon_{SH})_u \\ &= \frac{30}{35+30} \cdot 0,00082 \\ &= 0,000378\end{aligned}$$

Kehilangan gaya prategang akibat susut dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta f_{pSH} &= (\epsilon_{SH})_t \cdot E_s \\ &= 0,000378 \cdot 193000 \\ &= 73,0431 \text{ MPa}\end{aligned}$$

c. Kehilangan tegangan akibat relaksasi tendon (*relaxation of tendon*)

Berikut ini adalah perhitungan tegangan tarik akibat relaksasi tendon.

$$\text{Tegangan leleh tendon, } f_{py} = 1675 \text{ MPa}$$

$$\text{Tegangan baja prategang setelah transfer, } f_{ps} = 1179,9180 \text{ MPa}$$

Jembatan direncanakan untuk 50 tahun.

$$50 \text{ tahun} = 18250 \text{ hari} = 438000 \text{ jam}$$

Tendon menggunakan *low relaxation tendon*, maka kehilangan tegangan akibat relaksasi beton adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\Delta f_{pR} &= f_{ps} \cdot \frac{\log t}{45} \cdot \left( \frac{f_{ps}}{f_{py}} - 0.55 \right) \\ &= 1179,9180 \cdot \frac{\log(438000)}{45} \cdot \left( \frac{1179,9180}{1675} - 0.55 \right) \\ &= 22,8433 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Rekapitulasi kehilangan gaya prategang dapat dilihat pada Tabel 5.49.

**Tabel 5. 49 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang**

No.	Level Tegangan	Tegangan Baja	Persentase
		( MPa )	( % )
	Setelah Penegangan	1466,7637	100%
	Kehilangan Prategang		
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	12,8667	0,88%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	231,0504	15,75%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	42,9286	2,93%
	<i>f<sub>ps</sub></i> =	1179,9180	80,44%
4	Rangkak beton ( <i>creep</i> )	94,7027	6,46%
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	73,0431	4,98%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	22,8433	1,56%
	Tegangan Akhir ( <i>f<sub>pe</sub></i> )	989,3289	67,45%
	Kehilangan Tegangan Total ( <i>loss of prestress</i> )	477,4348	32,55%

Tegangan prategang efektif adalah sebagai berikut.

$$f_{eff} = 989,3289 \text{ MPa}$$

Gaya prategang efektif adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}P_{eff} &= A_{ps} \cdot f_{eff} \\ &= 5132,92 \cdot 989,3289 \cdot 10^{-3} \\ &= 5078,1461 \text{ kN}\end{aligned}$$

### 5.5.5 Tegangan yang Terjadi pada Penampang Balok

Pada desain gelagar prategang ini, tidak diijinkan adanya retak pada beton. Maka, tegangan tarik dan desak pada beton dibatasi sesuai dengan tegangan ijin sesuai dengan RSNIT-12-2004. Tegangan ijin beton pada kondisi transfer adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan tekan } f_{ci} = 0,6f'_{ci} = 0,6 \cdot 33,2 = 19,92 \text{ MPa}$$

$$\text{Tegangan tarik } f_{ti} = 0,25\sqrt{f'_{ci}} = 0,25\sqrt{33,2} = 1,44 \text{ MPa}$$

Tegangan ijin beton pada kondisi batas layan (setelah memperhitungkan seluruh kehilangan tegangan) adalah sebagai berikut.

$$\text{Tegangan tekan } f_c = 0,45f'_c = 0,45 \cdot 41,5 = 18,675 \text{ MPa}$$

$$\text{Tegangan tarik } f_t = 0,5\sqrt{f'_c} = 0,25\sqrt{51,5} = 3,22 \text{ MPa}$$

Berdasarkan tahap pembebanan, beton prategang dibagi menjadi 3 kondisi yaitu kondisi awal, kondisi saat pelat lantai selesai dicor dan kondisi komposit. Pada balok menerus terjadi momen positif pada daerah lapangan dan momen negatif pada daerah tumpuan. Akibatnya tegangan pada daerah lapangan dan tumpuan juga berbeda. Untuk itu perhitungan tegangan harus dihitung pada daerah lapangan dan daerah tumpuan untuk memastikan tegangan beton tidak melebihi tegangan ijin pada semua bentang.

#### 1. Tegangan Beton pada Tahap Pembebanan

##### a. Keadaan Awal (Saat Transfer)

Saat transfer *section properties* yang digunakan adalah *section properties I-Girder* karena gelagar diberi pelat lantai jembatan. Berikut ini adalah data data untuk perhitungan tegangan beton pada keadaan awal.

$$\text{Gaya prategang awal, } P_t = 6399,4637 \text{ kN}$$

$$\text{Momen positif akibat berat sendiri balok, } M_{bs+} = 1079,8460 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen negatif akibat berat sendiri balok, } M_{bs-} = 1920,5723 \text{ kNm}$$

$$\text{Luas penampang PCI, } A = 0,6695 \text{ m}^2$$

$$\text{Eksentrisitas tendon lapangan, } e_s = 0,4666 \text{ m}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon tumpuan, } e_s' = 0,7334 \text{ m}$$

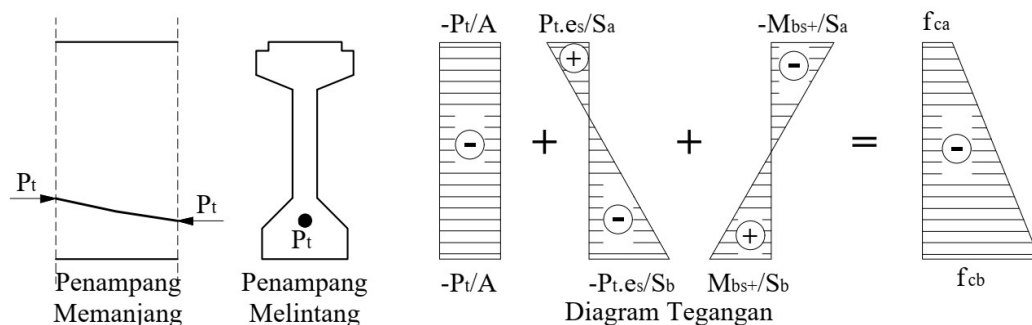
$$\text{Modulus penampang atas, } S_a = 0,2676 \text{ m}^3$$

Modulus penampang bawah,  $S_b = 0,2895 \text{ m}^3$

Berikut ini adalah perhitungan tegangan beton pada daerah lapangan dan daerah tumpuan.

1) Tegangan saat transfer di daerah lapangan.

Diagram tegangan pada saat transfer di daerah lapangan dapat dilihat pada Gambar 5.67.



**Gambar 5. 67 Diagram Tegangan pada saat Transfer di Daerah Lapangan**

Tegangan di serat atas

$$\begin{aligned}
 f_{ca} &= -\frac{P_t}{A_n} + \frac{P_t \cdot e_s}{S_a} - \frac{M_{bs}}{S_a} \\
 &= -\frac{6399,4637}{0,6695} + \frac{6399,4637 \cdot 0,4666}{0,2676} - \frac{1079,8460}{0,2676} \\
 &= -2435,9824 \text{ kPa} = -2,4360 \text{ MPa} < 19,92 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

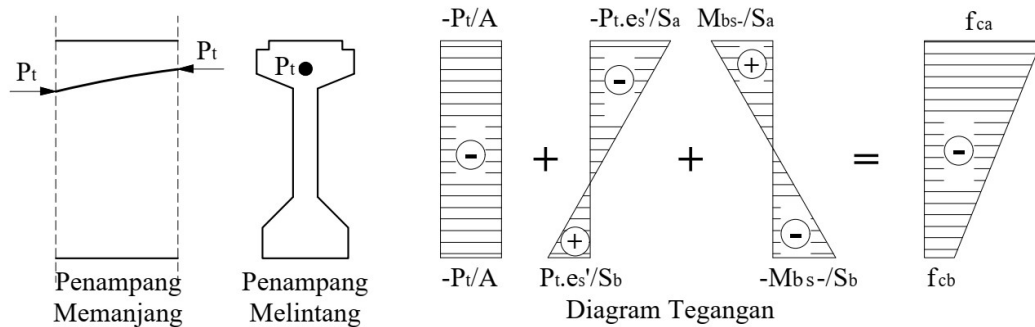
Tegangan di serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_{cb} &= -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{bs}}{S_b} \\
 &= -\frac{6399,4637}{0,6695} - \frac{6399,4637 \cdot 0,4666}{0,2895} + \frac{1079,8460}{0,2895} \\
 &= -16142,448 \text{ kPa} = -16,1424 \text{ MPa} < 19,920 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

## 2) Tegangan saat transfer di daerah tumpuan.

Diagram tegangan pada saat transfer di daerah tumpuan dapat dilihat pada Gambar 5.68.



**Gambar 5. 68 Diagram Tegangan pada saat Transfer di Daerah Tumpuan**

Tegangan di serat atas

$$\begin{aligned}
 f_{ca} &= -\frac{P_t}{A_n} - \frac{P_t \cdot e_s'}{S_a} + \frac{M_{bs}}{S_a} \\
 &= -\frac{6399,4637}{0,6695} - \frac{6399,4637 \cdot 0,7334}{0,2676} + \frac{1920,5723}{0,2676} \\
 &= -19920 \text{ kPa} = -19,920 \text{ MPa} = 19,92 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

Tegangan di serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_{cb} &= -\frac{P_t}{A} + \frac{P_t \cdot e_s'}{S_b} - \frac{M_{bs}}{S_b} \\
 &= -\frac{6399,4637}{0,6695} + \frac{6399,4637 \cdot 0,7334}{0,2895} - \frac{1920,5723}{0,2895} \\
 &= 19,1764 \text{ kPa} = 0,0192 \text{ MPa} < 1,440 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tarik pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tarik, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

b. Keadaan Setelah Pelat Lantai Selesai Dicor (Beton Muda)

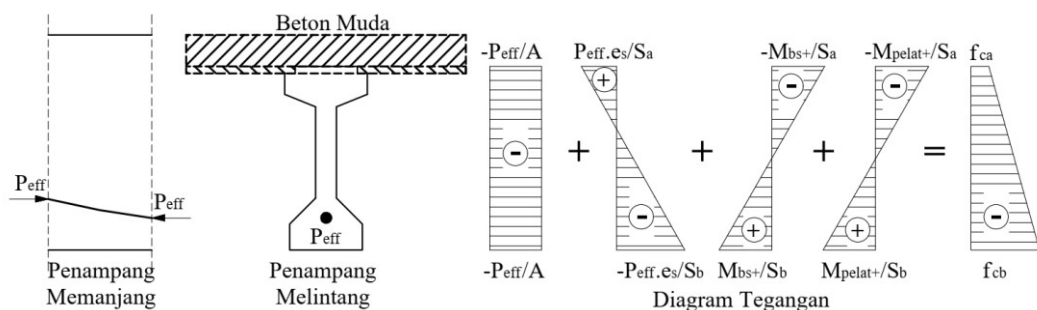
Setelah pelat lantai selesai di cor, *section properties* yang digunakan tetap menggunakan *section properties I-Gider* karena balok dan pelat belum menjadi satu kesatuan, tetapi balok sudah menahan beban akibat berat lantai jembatan.

Gaya prategang efektif,	$P_{eff}$	=5078,1461 kN
Momen positif akibat berat sendiri balok,	$M_{bs+}$	=1079,8460 kNm
Momen positif akibat berat pelat,	$M_{pelat+}$	=585,0750 kNm
Momen negatif akibat berat sendiri balok,	$M_{bs-}$	=1920,5723 kNm
Momen negatif akibat berat pelat,	$M_{pelat-}$	=1040,5917 kNm
Luas penampang PCI,	$A$	=0,6695 m <sup>2</sup>
Modulus penampang atas,	$S_a$	=0,2676 m <sup>3</sup>
Modulus penampang bawah,	$S_b$	=0,2895 m <sup>3</sup>
Eksentrisitas tendon lapangan,	$e_s$	=0,4666 m
Eksentrisitas tendon tumpuan,	$e_s'$	=0,7334 m

Berikut ini adalah perhitungan tegangan beton pada daerah lapangan dan daerah tumpuan.

1) Tegangan setelah pelat lantai selesai di cor di daerah lapangan.

Diagram tegangan setelah pelat lantai selesai di cor di daerah lapangan dapat dilihat pada Gambar 5.69.



**Gambar 5. 69 Diagram Tegangan Beton setelah Pelat Lantai Selesai Dicor di Daerah Lapangan**

Tegangan di serat atas

$$\begin{aligned}
 f_a &= -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \cdot e_s}{S_a} - \frac{M_{bs+} + M_{pelat}}{S_a} \\
 &= -\frac{5078,1461}{0,6695} + \frac{5078,1461 \cdot 0,4666}{0,2676} - \frac{1079,8460 + 585,0750}{0,2676} \\
 &= -4952,4385 \text{ kPa} = -4,9524 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

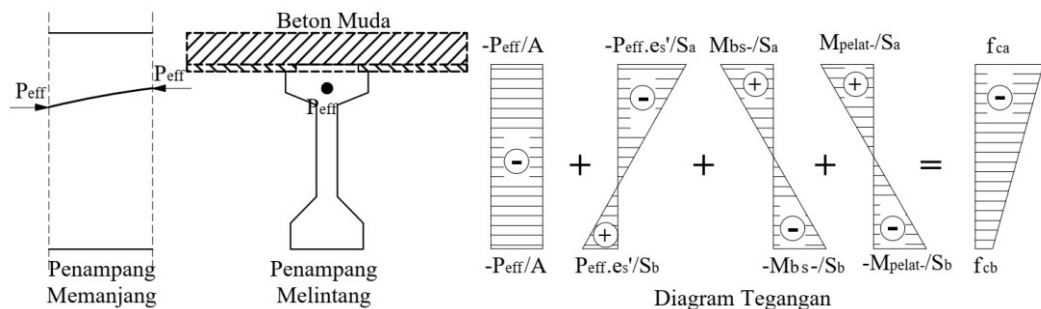
Tegangan di serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_b &= -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{bs+pelat}}{S_b} \\
 &= -\frac{5078,1461}{0,6695} - \frac{5078,1461 \cdot 0,4666}{0,2895} + \frac{1079,8460+585,0750}{0,2895} \\
 &= -10018,4164 \text{ kPa} = -10,0184 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

2) Tegangan setelah pelat lantai selesai di cor di daerah tumpuan.

Diagram tegangan setelah pelat lantai selesai di cor di daerah tumpuan dapat dilihat pada Gambar 5.70.



**Gambar 5. 70 Diagram Tegangan Beton setelah Pelat Lantai Selesai Dicor di Daerah Tumpuan**

$$\begin{aligned}
 f_a &= -\frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \cdot e_s'}{S_a} + \frac{M_{bs} + M_{pelat}}{S_a} \\
 &= -\frac{5078,1461}{0,6695} - \frac{5078,1461 \cdot 0,7334}{0,2676} + \frac{1920,5723+1040,5917}{0,2676} \\
 &= -10436,8288 \text{ kPa} = -10,4368 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

Tegangan di serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_b &= -\frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \cdot e_s'}{S_b} - \frac{M_{bs+pelat}}{S_b} \\
 &= -\frac{5078,1461}{0,6695} + \frac{5078,1461 \cdot 0,7334}{0,2895} - \frac{1920,5723+1040,5917}{0,2895} \\
 &= -4948,8347 \text{ kPa} = -4,9488 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$



Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

c. Keadaan setelah pelat dan balok menjadi komposit

*Section properties* yang digunakan adalah *section properties* balok komposit karena balok dan pelat sudah menyatu menjadi satu kesatuan.

Gaya prategang efektif,  $P_{eff} = 5078,1461 \text{ kN}$

Momen positif akibat berat sendiri balok,  $M_{bs+} = 1079,8460 \text{ kNm}$

Momen positif akibat berat pelat,  $M_{pelat+} = 585,0750 \text{ kNm}$

Momen negatif akibat berat sendiri balok,  $M_{bs-} = 1920,5723 \text{ kNm}$

Momen negatif akibat berat pelat,  $M_{pelat-} = 1040,5917 \text{ kNm}$

Luas penampang balok komposit,  $A_c = 0,9323 \text{ m}^2$

Titik berat balok komposit terhadap alas,  $y_{ac} = 0,8062 \text{ m}$

Titik berat balok komposit terhadap alas,  $y_{bc} = 1,0938 \text{ m}$

Titik berat tendon lapangan terhadap alas,  $Z_0 = 0,35 \text{ m}$

Titik berat tendon tumpuan terhadap alas,  $Z_0' = 0,15 \text{ m}$

Modulus penampang atas balok komposit,  $S_{ac} = 0,5207 \text{ m}^3$

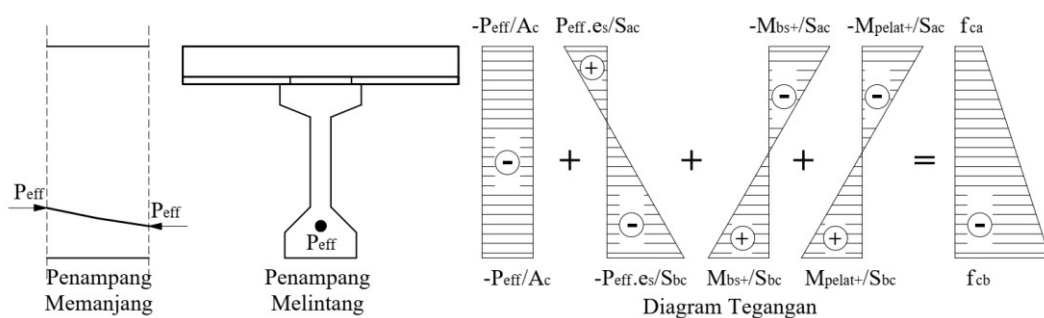
Modulus penampang atas balok,  $S'_{ac} = 0,6924 \text{ m}^3$

Modulus penampang sisi bawah balok,  $S_{bc} = 0,3838 \text{ m}^3$

Berikut ini adalah perhitungan tegangan beton pada daerah lapangan dan daerah tumpuan.

1) Tegangan beton di lapangan

Diagram tegangan balok komposit di daerah lapangan dapat dilihat pada Gambar 5.71.



**Gambar 5. 71 Diagram Tegangan Balok Komposit di Daerah Lapangan**

Eksentrisitas tendon lapangan,

$$e_s = y_{bc} - Z_0 = 1,0938 - 0,35 = 0,7438 \text{ m}$$

Tegangan beton di serat atas pelat,

$$\begin{aligned} f_{ac} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} - \frac{M_{bs+pelat}}{S_{ac}} \\ &= -\frac{5078,1461}{0,9323} + \frac{5078,1461 \cdot 0,7438}{0,5207} - \frac{1079,8460 + 585,0750}{0,5207} \\ &= -1390,6781 \text{ kPa} = -1,3907 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas pelat yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas pelat tidak retak.

Tegangan beton di serat atas balok,

$$\begin{aligned} f'_{ac} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e_s}{S'_{ac}} - \frac{M_{bs+pelat}}{S'_{ac}} \\ &= -\frac{5078,1461}{0,9323} + \frac{5078,1461 \cdot 0,7438}{0,6924} - \frac{1079,8460 + 585,0750}{0,6924} \\ &= -2396,9505 \text{ kPa} = -2,3970 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

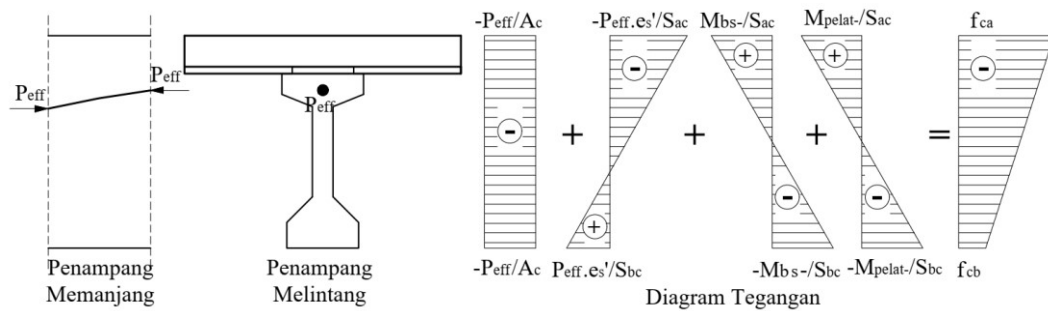
Tegangan beton di serat bawah balok

$$\begin{aligned} f_{bc} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff}e_s}{S_{bc}} + \frac{M_{bs+pelat}}{S_{bc}} \\ &= -\frac{5078,1461}{0,9323} - \frac{5078,1461 \cdot 0,7438}{0,3838} + \frac{1079,8460 + 585,0750}{0,3838} \\ &= -10950,2653 \text{ kPa} = -10,9503 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

## 2) Tegangan beton di tumpuan,

Diagram tegangan balok komposit di daerah tumpuan dapat dilihat pada Gambar 5.72.



**Gambar 5. 72 Diagram Tegangan Balok Komposit di Daerah Tumpuan**

Eksentrisitas tendon tumpuan,

$$e_s = y_{ac} - Z_0 - h_0 = 0,8062 - 0,15 - 0,2 = 0,4562 \text{ m}$$

Tegangan beton di serat atas pelat

$$\begin{aligned} f_{ac} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \cdot e_s}{S_{ac}} - \frac{M_{bs+pelat}}{S_{ac}} \\ &= -\frac{5078,1461}{0,9323} + \frac{5078,1461 \cdot 0,4562}{0,5207} - \frac{1920,5723 + 1040,5917}{0,5207} \\ &= -4209,5123 \text{ kPa} = -4,2095 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas pelat yang tidak melebihi tegangan ijin tarik, maka beton pada serat atas pelat tidak retak.

Tegangan beton di serat atas balok

$$\begin{aligned} f'_{ac} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \cdot e_s}{S'_{ac}} - \frac{M_{bs+pelat}}{S'_{ac}} \\ &= -\frac{5078,1461}{0,9323} + \frac{5078,1461 \cdot 0,4562}{0,6924} - \frac{1920,5723 + 1040,5917}{0,6924} \\ &= -4516,5189 \text{ kPa} = -4,5165 \text{ MPa} < 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat atas balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat atas balok tidak retak.

Tegangan beton di serat bawah balok

$$\begin{aligned} f_{bc} &= -\frac{P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff} \cdot e_s}{S_{bc}} + \frac{M_{bs+pelat}}{S_{bc}} \\ &= -\frac{5078,1461}{0,9323} - \frac{5078,1461 \cdot 0,4562}{0,3838} + \frac{1920,5723 + 1040,5917}{0,3838} \\ &= -7126,0755 \text{ kPa} = -7,1261 \text{ MPa} > 18,675 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Terjadi tegangan tekan pada serat bawah balok yang tidak melebihi tegangan ijin tekan, maka beton pada serat bawah balok tidak retak.

## 2. Tegangan Beton Akibat Beban

Data yang digunakan dalam perhitungan tegangan akibat beban adalah sebagai berikut.

Modulus penampang atas pelat,  $S_{ac} = 0,5207 \text{ m}^3$

Modulus penampang atas balok,  $S'_{ac} = 0,6924 \text{ m}^3$

Modulus penampang bawah balok,  $S_{bc} = 0,3838 \text{ m}^3$

### a. Berat sendiri

#### 1) Tegangan di daerah lapangan

Momen akibat berat sendiri,  $M_{MS+} = 1886,7751 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{MS+}}{S_{ac}} = -\frac{1886,7751}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -3,6237 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{MS+}}{S'_{ac}} = -\frac{1886,7751}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -2,7248 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{MS+}}{S_{bc}} = \frac{1886,7751}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 4,9162 \text{ Mpa}$$

#### 2) Tegangan di tumpuan

Momen akibat berat sendiri,  $M_{MS-} = 3355,7451 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = \frac{M_{MS-}}{S_{ac}} = \frac{3355,7451}{0,5207} \cdot 10^{-3} = 6,4450 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = \frac{M_{MS-}}{S'_{ac}} = \frac{3355,7451}{0,6924} \cdot 10^{-3} = 4,8460 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{M_{MS-}}{S_{bc}} = -\frac{3355,7451}{0,3838} \cdot 10^{-3} = -8,7438 \text{ Mpa}$$

### b. Beban mati tambahan

#### 1) Tegangan di lapangan

Momen akibat beban mati tambahan,  $M_{MA+} = 186,0538 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{MA+}}{S_{ac}} = -\frac{186,0538}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,3573 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f_{ac} = -\frac{M_{MA+}}{S_{ac}} = -\frac{186,0538}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,2687 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{MA+}}{S_{bc}} = \frac{186,0538}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,4848 \text{ MPa}$$

## 2) Tegangan di tumpuan

Momen akibat beban mati tambahan,  $M_{MA-} = 330,9082 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = \frac{M_{MA-}}{S_{ac}} = \frac{330,9082}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,6355 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f_{ac} = \frac{M_{MA-}}{S_{ac}} = \frac{330,9082}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,4779 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{M_{MA-}}{S_{bc}} = -\frac{330,9082}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,8622 \text{ Mpa}$$

## c. Susut dan rangkak

### 1) Susut

Luas penampang pelat,  $A_{pelat} = 0,2628 \text{ m}^2$

$$k_b = 0,905$$

$$k_c = 3$$

$$k_d = 0,938$$

$$k_e = 0,734$$

$$k_m = 0,2$$

$$\varepsilon_b = 0,0006$$

$$\begin{aligned} \Delta_{esu} &= \varepsilon_b \cdot k_b \cdot k_e \\ &= 0,0006 \cdot 0,905 \cdot 0,734 \\ &= 0,000398 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_f &= k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot (1 - k_m) \\ &= 0,905 \cdot 3 \cdot 0,938 \cdot 0,734 \cdot (1 - 0,2) \\ &= 1,4954 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{sh} &= A_{pelat} \cdot E_{pelat} \cdot \Delta_{esu} \cdot n \cdot \frac{1-e^{-cf}}{cf} \\
 &= 0,2628 \cdot 25332084 \cdot 0,000398 \cdot 0,7102 \cdot \frac{1-e^{-1,4954}}{1,4954} \\
 &= 976,5296 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Eksentrisitas gaya susut, } e &= y_{ac} - \frac{h_0}{2} \\
 &= 0,8062 - \frac{0,2}{2} \\
 &= 0,7062 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{P_{sh}}{A_c} + \frac{P_{sh} \cdot e_s}{S_{ac}} = -\frac{976,5296}{0,9323} - \frac{976,5296 \cdot 0,7062}{0,5207} = -2,3720 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{P_{sh}}{A_c} + \frac{P_{sh} \cdot e_s}{S_{ac}} = -\frac{976,5296}{0,9323} - \frac{976,5296 \cdot 0,7062}{0,6924} = -2,0434 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{P_{sh}}{A_c} + \frac{P_{sh} \cdot e_s}{S_{ac}} = -\frac{976,5296}{0,9323} + \frac{976,5296 \cdot 0,7062}{0,3838} = 0,7495 \text{ MPa}$$

## 2) Rangkak

$$P_i = 6056,4246 \text{ kN}$$

$$P_{eff} = 5078,1461 \text{ kN}$$

$$\sigma_{cr} = (1-e^{-cf})(\sigma_2 - \sigma_1)$$

$\sigma_1$  = tegangan akibat berat sendiri dengan gaya prategang awal

$\sigma_2$  = tegangan akibat berat sendiri dengan gaya prategang efektif

$cf$  = residual creep factor

$$cf = k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot (1 - k_m)$$

$$= 0,905 \cdot 3 \cdot 0,938 \cdot 0,734 \cdot (1 - 0,2)$$

$$= 1,4954$$

$\sigma_1$  dihitung dengan persamaan berikut,

$$f = -\frac{P_t}{A_c} \pm \frac{P_t \cdot e_s}{S} \pm \frac{M_{balok+pelat}}{S}$$

$\sigma_2$  dihitung dengan persamaan berikut,

$$f = -\frac{P_{eff}}{A_c} \pm \frac{P_{eff} \cdot e_s}{S} \pm \frac{M_{balok+pelat}}{S}$$

Hasil perhitungan tegangan akibat rangkai dapat dilihat pada Tabel 5.50 dan Tabel 5.51.

**Tabel 5. 50 Tegangan Akibat Rangkai di Lapangan**

Letak	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2 - \sigma_1$ (MPa)	$(1 - e^{-cf})$	$\sigma_{cr}$ (MPa)
<i>fca</i>	-1,3907	-1,0426	-0,3481	0,7758	-0,2701
<i>f'ca</i>	-2,3970	-2,3955	-0,0014	0,7758	-0,0011
<i>fcb</i>	-10,9503	-13,8955	-2,9452	0,7758	-2,2850

**Tabel 5. 51 Tegangan Akibat Rangkai di Tumpuan**

Letak	$\sigma_2$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	$\sigma_2 - \sigma_1$ (MPa)	$(1 - e^{-cf})$	$\sigma_{cr}$ (MPa)
<i>fca</i>	-4,2095	-6,1161	-1,9065	0,7758	-1,4792
<i>f'ca</i>	-4,5165	-6,2104	1,6939	0,7758	1,3142
<i>fcb</i>	-7,1261	-7,0125	-0,1136	0,7758	-0,0881

Setelah tegangan akibat rangkai dan susut diketahui, tegangan akibat susut dan rangkai dijumlahkan. Hasil perhitungan tegangan akibat susut dan rangkai dapat dilihat pada Tabel 5.52 dan Tabel 5.53.

**Tabel 5. 52 Tegangan Akibat Susut dan Rangkai di Lapangan**

Letak	Susut	Rangkai	Susut dan Rangkai
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
<i>fca</i>	-2,3720	-0,2701	-2,6421
<i>f'ca</i>	-2,0434	-0,0011	-2,0446
<i>fcb</i>	0,7495	-2,2850	-1,5356

**Tabel 5. 53 Tegangan Akibat Susut dan Rangkai di Tumpuan**

Letak	Susut	Rangkai	Susut dan Rangkai
	(MPa)	(MPa)	(MPa)
<i>fca</i>	-2,3720	-1,4792	-3,8512
<i>f'ca</i>	-2,0434	1,3142	-0,7292
<i>fcb</i>	0,7495	-0,0881	0,6614

## d. Prategang

Gaya prategang efektif,  $P_{eff} = 5078,1461 \text{ kN}$

Luas penampang balok komposit,  $A_c = 0,9323 \text{ m}^2$

## 1) Tegangan di lapangan

Eksentrisitas tendon lapangan saat komposit,  $e_s = 0,7438 \text{ m}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5078,1461}{0,9323} + \frac{5078,1461 \cdot 0,7438}{0,5207} = 1,8070 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5078,1461}{0,9323} + \frac{5078,1461 \cdot 0,7438}{0,6924} = 0,0074 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5078,1461}{0,9323} - \frac{5078,1461 \cdot 0,7438}{0,3838} = -15,2884 \text{ MPa}$$

## 2) Tegangan di Tumpuan

Eksentrisitas tendon tumpuan saat komposit,  $e_s = 0,4562 \text{ m}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5078,1461}{0,9323} - \frac{5078,1461 \cdot 0,4562}{0,5207} = -9,8967 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{P_{eff}}{A_c} - \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5078,1461}{0,9323} - \frac{5078,1461 \cdot 0,4562}{0,6924} = -8,7929 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff}e_s}{S_{ac}} = -\frac{5078,1461}{0,9323} + \frac{5078,1461 \cdot 0,4562}{0,3838} = 0,5895 \text{ MPa}$$

## e. Beban lajur "D"

## 1) Tegangan di lapangan

Momen akibat beban lajur "D",  $M_{TD+} = 1320,2239 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{TD+}}{S_{ac}} = -\frac{1320,2239}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -2,2535 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{TD+}}{S'_{ac}} = -\frac{1320,2239}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -1,9066 \text{ MPa}$$



Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{TD+}}{S_{bc}} = \frac{1320,2239}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 3,4400 \text{ MPa}$$

2) Tegangan di tumpuan

Momen akibat beban lajur “D”,  $M_{TD-} = 2595,0894 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = \frac{M_{TD-}}{S_{ac}} = \frac{2595,0894}{0,5207} \cdot 10^{-3} = 4,9861 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = \frac{M_{TD-}}{S'_{ac}} = \frac{2595,0894}{0,6924} \cdot 10^{-3} = 3,7477 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{M_{TD-}}{S_{bc}} = -\frac{2595,0894}{0,3838} \cdot 10^{-3} = -6,7617 \text{ MPa}$$

f. Gaya rem

1) Tegangan di lapangan

Momen akibat gaya rem,  $M_{TB+} = 37,8390 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{TB+}}{S_{ac}} = -\frac{37,8390}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,0727 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{TB+}}{S'_{ac}} = -\frac{37,8390}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,0546 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{TB+}}{S_{bc}} = \frac{37,8390}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,0986 \text{ MPa}$$

2) Tegangan di tumpuan

Momen akibat gaya rem,  $M_{TB-} = 64,0042 \text{ kNm}$

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = \frac{M_{TB-}}{S_{ac}} = \frac{64,0042}{0,5207} \cdot 10^{-3} = 0,1229 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = \frac{M_{TB-}}{S'_{ac}} = \frac{64,0042}{0,6924} \cdot 10^{-3} = 0,0924 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{M_{TB-}}{S_{bc}} = -\frac{64,0042}{0,3838} \cdot 10^{-3} = -0,1668 \text{ MPa}$$

## g. Beban angin kendaraan

## 1) Tegangan di lapangan

Momen akibat beban angin kendaraan,  $M_{EWL+}=47,4954$  kNm

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EWL+}}{S_{ac}} = -\frac{47,4954}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,0912 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{EWL+}}{S'_{ac}} = -\frac{47,4954}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,0686 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{EWL+}}{S_{bc}} = \frac{47,4954}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,1238 \text{ MPa}$$

## 2) Tegangan di tumpuan

Momen akibat beban angin kendaraan,  $M_{EWL-}=84,4735$  kNm

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = \frac{M_{EWL-}}{S_{ac}} = \frac{84,4735}{0,5207} \cdot 10^{-3} = 0,1622 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = \frac{M_{EWL-}}{S'_{ac}} = \frac{84,4735}{0,6924} \cdot 10^{-3} = 0,1220 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{M_{EWL-}}{S_{bc}} = -\frac{84,4735}{0,3838} \cdot 10^{-3} = -0,2201 \text{ Mpa}$$

## h. Temperatur seragam

## 1) Tegangan di lapangan

Momen akibat temperatur seragam,  $M_{EUn+}=66,0977$  kNm

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EUn+}}{S_{ac}} = -\frac{66,0977}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,1269 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{EUn+}}{S'_{ac}} = -\frac{66,0977}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,0955 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{EUn+}}{S_{bc}} = \frac{66,0977}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,1722 \text{ MPa}$$

## 2) Tegangan di tumpuan

Momen akibat temperatur seragam,  $M_{EU_n-}=117,5587$  kNm

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = \frac{M_{EU_n-}}{S_{ac}} = \frac{117,5587}{0,5207} \cdot 10^{-3} = 0,2258 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = \frac{M_{EU_n-}}{S'_{ac}} = \frac{117,5587}{0,6924} \cdot 10^{-3} = 0,1698 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{M_{EU_n-}}{S_{bc}} = -\frac{117,5587}{0,3838} \cdot 10^{-3} = -0,3063 \text{ Mpa}$$

## i. Beban gempa

## 1) Tegangan di lapangan

Momen akibat beban gempa,  $M_{EQ-}=297,0853$  kNm

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = -\frac{M_{EQ-}}{S_{ac}} = -\frac{297,0853}{0,5207} \cdot 10^{-3} = -0,5706 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = -\frac{M_{EQ-}}{S'_{ac}} = -\frac{297,0853}{0,6924} \cdot 10^{-3} = -0,4290 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = \frac{M_{EQ-}}{S_{bc}} = \frac{297,0853}{0,3838} \cdot 10^{-3} = 0,7741 \text{ MPa}$$

## 2) Tegangan di tumpuan

Momen akibat beban gempa,  $M_{EQ+}=528,3843$  kNm

Tegangan di serat atas pelat,

$$f_{ac} = \frac{M_{EQ+}}{S_{ac}} = \frac{528,3843}{0,5207} \cdot 10^{-3} = 1,0148 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat atas balok,

$$f'_{ac} = \frac{M_{EQ+}}{S'_{ac}} = \frac{528,3843}{0,6924} \cdot 10^{-3} = 0,7631 \text{ MPa}$$

Tegangan di serat bawah balok,

$$f_{bc} = -\frac{M_{EQ+}}{S_{bc}} = -\frac{528,3843}{0,3838} \cdot 10^{-3} = -1,3767 \text{ Mpa}$$

### 3. Tegangan Beton Terhadap Kombinasi Pembebanan

Tegangan akibat kombinasi pembebanan di lapangan dapat dilihat pada Tabel 5.54.

**Tabel 5. 54 Tegangan Beton Akibat Kombinasi Pembebanan di Lapangan**

Kombinasi	Letak	MS Precast	MS Cor	MA	PR	SR	TD	TB	EWL	EU <sub>ln</sub>	EQ	Tegangan Kombinasi	Tegangan Ijin	Keterangan
Kuat I	<i>f<sub>ac</sub></i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642	-2,536	-0,073		-0,127		-7,551	18,675	AMAN
	<i>f<sub>ac</sub></i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045	-1,907	-0,055		-0,095		-7,087	18,675	AMAN
	<i>f<sub>bc</sub></i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536	3,440	0,099		0,172		-7,712	18,675	AMAN
Kuat II	<i>f<sub>ac</sub></i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642	-2,536	-0,073		-0,127		-7,551	18,675	AMAN
	<i>f<sub>ac</sub></i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045	-1,907	-0,055		-0,095		-7,087	18,675	AMAN
	<i>f<sub>bc</sub></i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536	3,440	0,099		0,172		-7,712	18,675	AMAN
Kuat III	<i>f<sub>ac</sub></i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642				-0,127		-4,943	18,675	AMAN
	<i>f<sub>ac</sub></i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045				-0,095		-5,126	18,675	AMAN
	<i>f<sub>bc</sub></i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536				0,172		-11,251	18,675	AMAN
Kuat IV	<i>f<sub>ac</sub></i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642				-0,127		-4,943	18,675	AMAN
	<i>f<sub>ac</sub></i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045				-0,095		-5,126	18,675	AMAN
	<i>f<sub>bc</sub></i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536				0,172		-11,251	18,675	AMAN
Kuat V	<i>f<sub>ac</sub></i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642			-0,091	-0,127		-5,034	18,675	AMAN
	<i>f<sub>ac</sub></i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045			-0,069	-0,095		-5,195	18,675	AMAN
	<i>f<sub>bc</sub></i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536			0,124	0,172		-11,127	18,675	AMAN
Ekstrem I	<i>f<sub>ac</sub></i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642	-2,536	-0,073			-0,571	-7,995	18,675	AMAN
	<i>f<sub>ac</sub></i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045	-1,907	-0,055			-0,429	-7,421	18,675	AMAN
	<i>f<sub>bc</sub></i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536	3,440	0,099			0,774	-7,110	18,675	AMAN
Ekstrem II	<i>f<sub>ac</sub></i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642	-2,536	-0,073				-7,424	18,675	AMAN
	<i>f<sub>ac</sub></i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045	-1,907	-0,055				-6,992	18,675	AMAN
	<i>f<sub>bc</sub></i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536	3,440	0,099				-7,884	18,675	AMAN

Tabel 5.54 Lanjutan

Kombinasi	Letak	MS Precast	MS Cor	MA	PR	SR	TD	TB	EWL	EUn	EQ	Tegangan Kombinasi	Tegangan Ijin	Keterangan
Layan I	<i>fac</i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642	-2,536	-0,073	-0,091	-0,127		-7,643	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045	-1,907	-0,055	-0,069	-0,095		-7,156	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536	3,440	0,099	0,124	0,172		-7,588	18,675	AMAN
Layan II	<i>fac</i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642	-2,536	-0,073		-0,127		-7,551	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045	-1,907	-0,055		-0,095		-7,087	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536	3,440	0,099		0,172		-7,712	18,675	AMAN
Layan III	<i>fac</i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642	-2,536	-0,073		-0,127		-7,551	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045	-1,907	-0,055		-0,095		-7,087	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536	3,440	0,099		0,172		-7,712	18,675	AMAN
Layan IV	<i>fac</i>	-2,074	-1,550	-0,357	1,807	-2,642				-0,127		-4,943	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	-1,559	-1,165	-0,269	0,007	-2,045				-0,095		-5,126	18,675	AMAN
	<i>bbc</i>	2,814	2,103	0,485	-15,288	-1,536				0,172		-11,251	18,675	AMAN

Tegangan akibat kombinasi pembebanan di tumpuan dapat dilihat pada Tabel 5.55.

**Tabel 5. 55 Tegangan Beton Akibat Kombinasi Pembebanan di Tumpuan**

Kombinasi	Letak	MS Precast	MSCor	MA	PR	SR	TD	TB	EWL	EUn	EQ	Tegangan Kombinasi	Tegangan Ijin	Keterangan
Kuat I	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851	4,984	0,123		0,226		-1,335	18,675	AMAN
	<i>f'ac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358	3,748	0,092		0,170		-2,817	18,675	AMAN
	<i>fib</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661	-6,762	-0,167		-0,306		-15,590	18,675	AMAN
Kuat II	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851	4,984	0,123		0,226		-1,335	18,675	AMAN
	<i>f'ac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358	3,748	0,092		0,170		-2,817	18,675	AMAN
	<i>fib</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661	-6,762	-0,167		-0,306		-15,590	18,675	AMAN
Kuat III	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851				0,226		-6,442	18,675	AMAN
	<i>f'ac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358				0,170		-6,657	18,675	AMAN
	<i>fib</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661				-0,306		-8,661	18,675	AMAN
Kuat IV	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851				0,226		-6,442	18,675	AMAN
	<i>f'ac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358				0,170		-6,657	18,675	AMAN
	<i>fib</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661				-0,306		-8,661	18,675	AMAN
Kuat V	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851			0,162	0,226		-6,279	18,675	AMAN
	<i>f'ac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358			0,122	0,170		-6,535	18,675	AMAN
	<i>fib</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661			-0,220	-0,306		-8,881	18,675	AMAN
Ekstrem I	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851	4,984	0,123			1,015	-0,545	18,675	AMAN
	<i>f'ac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358	3,748	0,092			0,763	-2,223	18,675	AMAN
	<i>fib</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,5895	0,661	-6,762	-0,167			-1,377	-16,660	18,675	AMAN
Ekstrem II	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851	4,984	0,123				-1,560	18,675	AMAN
	<i>f'ac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358	3,748	0,092				-2,986	18,675	AMAN
	<i>fib</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661	-6,762	-0,167				-15,284	18,675	AMAN

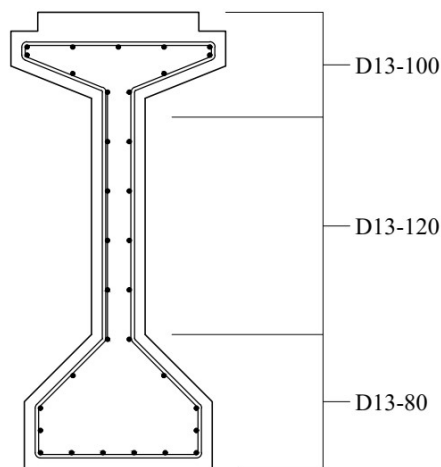
Tabel 5.55 Lanjutan

Kombinasi	Letak	MS Precast	MS Cor	MA	PR	SR	TD	TB	EWL	EUn	EQ	Tegangan Kombinasi	Tegangan Ijin	Keterangan
Layan I	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851	4,984	0,123	0,162	0,226		-1,172	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358	3,748	0,092	0,122	0,170		-2,695	18,675	AMAN
	<i>fcc</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661	-6,762	-0,167	-0,220	-0,306		-15,810	18,675	AMAN
Layan II	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851	4,984	0,123		0,226		-1,335	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358	3,748	0,092		0,170		-2,817	18,675	AMAN
	<i>fcc</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661	-6,762	-0,167		-0,306		-15,590	18,675	AMAN
Layan III	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851	4,984	0,123		0,226		-1,335	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358	3,748	0,092		0,170		-2,817	18,675	AMAN
	<i>fcc</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661	-6,762	-0,167		-0,306		-15,590	18,675	AMAN
Layan IV	<i>fac</i>	3,689	2,756	0,636	-9,897	-3,851				0,226		-6,442	18,675	AMAN
	<i>fac</i>	2,774	2,073	0,478	-8,793	-3,358				0,170		-6,657	18,675	AMAN
	<i>fcc</i>	-5,004	-3,739	-0,862	0,589	0,661				-0,306		-8,661	18,675	AMAN

### 5.5.6 Perhitungan Baja Tulangan

Baja tulangan dihitung berdasarkan rasio minimum baja tulangan terhadap luas penampang balok. Penampang gelagar yang digunakan pada desain balok menerus sama dengan yang digunakan pada desain balok sederhana, sehingga desain tulangan akan sama dengan desain balok sederhana.

Detail penulangan yang digunakan pada gelagar prategang dapat dilihat pada Gambar 5.73.



**Gambar 5. 73 Penampang Melintang PCI-Girder dengan Detail Penulangan**

### 5.5.7 Kekuatan Batas Lentur (*Ultimate Flexural Capacity*)

Kekuatan batas lentur *PCI-Girder* dapat dihitung dengan langkah-langkah sebagai berikut.

Modulus elastisitas baja prategang,  $E_s=193000$  MPa

Luas tampang balok komposit,  $A_c = 0,9323$  m<sup>2</sup>

Luas tampang tendon,  $A_p = 0,0051$  m<sup>2</sup> = 5132,92 mm<sup>2</sup>

Tegangan leleh *strand*,  $f_y = 1675$  MPa

Tegangan ultimit *strand*,  $f_{pu} = 1860$  MPa

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = \frac{1675}{1860} = 0,849, \text{ maka berdasarkan Tabel 3.10, } \gamma = 0,55$$

$$\rho_p = \frac{A_p}{A_c} = \frac{0,0051}{0,9323} = 0,0055$$



$$\begin{aligned}\beta_1 &= 0,85 - \frac{0,05}{7} (f'_c - 30) \\ &= 0,85 - \frac{0,05}{7} (41,5 - 30) \\ &= 0,7679\end{aligned}$$

Tegangan baja prategang saat  $M_n$  dicapai :

$$\begin{aligned}f_{ps} &= f_{pu} \cdot \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_c} \right\} \\ &= 1860 \cdot \left\{ 1 - \frac{0,55}{0,7686} \cdot 0,0055 \cdot \frac{1860}{41,5} \right\} \\ &= 1531,2358 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Tegangan ijin Tarik baja prategang,

$$f_{ps} = 0,82 \cdot f_{py} = 0,82 \cdot 1675 = 1373,5 \text{ MPa}$$

Maka dipakai  $f_{ps} = 1373,5 \text{ MPa}$

Gaya tarik,

$$T_s = A_p \cdot f_{ps} = 5132,92 \cdot 1373,5 = 7050065,62 \text{ N}$$

Gaya tarik pada baja prategang sama dengan gaya desak yang terjadi pada beton, maka luas penampang beton yang menerima gaya tekan dapat dihitung sebagai berikut.

$$A_{cc} = \frac{T_s}{0,85 \cdot f'_c} = \frac{7050065,62}{0,85 \cdot 41,5} \cdot 10^{-6} = 0,1999 \text{ m}^2$$

Balok menerus harus bisa menahan momen positif di daerah lapangan dan momen negatif pada daerah tumpuan. Untuk itu, momen nominal positif dan negatif gelagar dihitung untuk memastikan gelagar aman dalam menahan momen positif dan negatif. Perhitungan momen nominal positif dan negatif balok adalah sebagai berikut.

#### 1. Momen Nominal Ultimit untuk Menahan Momen Positif

Menghitung kedalaman efektif balok

$$\text{Tinggi PCI-Girder, } H = 1,7 \text{ m}$$

$$\text{Tebal slab jembatan, } h_0 = 0,2 \text{ m}$$

$$\text{Titik berat tendon terhadap alas, } Z_0 = 0,35 \text{ m}$$

Kedalaman efektif PCI-Girder

$$d = H + h_0 - Z_0 = 1,7 + 0,2 - 0,35 = 1,55 \text{ m}$$

Tinggi balok tekan,

$a = \frac{A_{cc}}{b}$ , diasumsikan garis netral terletak pada slab jembatan,

Maka,  $b_{eff} = 1,3138$  m

$h = 0,2$  m

$$= \frac{0,1999}{1,3138}$$

$= 0,1521$  m  $< h = 0,2$  m, maka asumsi benar.

Tulangan non prategang pada desain gelagar prategang diabaikan, maka momen nominal dihitung sebagai berikut.

$$\begin{aligned} M_n &= T_s \cdot (d - a/2) \\ &= 7050065,62 \cdot 10^{-3} \cdot (1,55 - 0,1521 / 2) \\ &= 10391,3738 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,8 \cdot 10391,3738 = 8313,0990 \text{ kNm}$$

## 2. Momen Nominal Ultimit untuk Menahan Momen Negatif

Menghitung kedalaman efektif balok

Tinggi *PCI-Girder*,  $H = 1,7$  m

Titik berat tendon terhadap alas,  $Z_0 = 0,15$  m

Kedalaman efektif *PCI-Girder*

$$d = H + h_0 - Z_0 = 1,7 - 0,15 = 1,55 \text{ m}$$

Momen nominal negatif dihitung pada Tabel 5.56.

**Tabel 5. 56 Perhitungan Gaya Tekan dan Momen Nominal Negatif**

No.	Lebar ( <i>b</i> )	Tinggi ( <i>h</i> )	Luas	Gaya	Lengan thd. pusat baja prestress	<i>y</i>	Momen
	(m)	(m)				(m <sup>2</sup> )	
6	0,7000	0,2500	0,1750	6173,1250	$y = d - h/2$	1,4250	8796,7031
5	0,2500	0,0375	0,0173	611,8008	$y = d - h/2 - y_5$	1,2818	784,1798
4	0,2000	0,0375	0,0075	264,5625	$y = d - h/2 - h'/2$	1,2813	338,9707
		$\Sigma =$	0,1998	7049,488		$\Sigma M =$	9919,8536

$$\phi \cdot M_n = 0,8 \cdot 9919,8536 = 7935,8829 \text{ kNm}$$

### **5.5.8 Kontrol Momen Ultimit Akibat Kombinasi Pembebanan**

Momen ultimit akibat kombinasi pembebanan dihitung dengan cara mengalikan momen akibat beban dengan faktor beban ultimit sesuai SNI-1725-2016 (2016).

Pada balok menerus terjadi momen positif di daerah lapangan dan momen negatif di daerah tumpuan, untuk itu maka momen ultimit juga harus di cek pada kedua momen yang terjadi. Berikut ini adalah kombinasi momen positif dan negatif pada *PCI-Girder*.

1. Kombinasi Momen Positif di Daerah Lapangan

Kombinasi momen positif di daerah lapangan dapat dilihat pada Tabel 5.57.

**Tabel 5. 57 Momen Positif Ultimit Akibat Kombinasi Pembebanan**

Keadaan Batas	MS (Berat Sendiri)		MA	PR	SH	TD	TB	EWL	EU <sub>n</sub>	EQ	Momen Ultimit	Keterangan
	Pracetak	Cor Ditempat	Mati Tambahan	Prategang	Susut Rangkak	Lajur "D"	Rem	Angin Kendaraan	Temperatur Seragam	Gempa	<i>Mu</i>	
Kuat I	1295,816	1049,008	372,108	-3776,988	836,206	2376,403	68,110		79,317		2299,980	AMAN
Kuat II	1295,816	1049,008	372,108	-3776,988	836,206	1848,313	52,975		79,317		1756,755	AMAN
Kuat III	1295,816	1049,008	372,108	-3776,988	836,206				79,317		-144,533	AMAN
Kuat IV	1295,816	1049,008	372,108	-3776,988	836,206				79,317		-144,533	AMAN
Kuat V	1295,816	1049,008	372,108	-3776,988	836,206			47,496	79,317		-97,038	AMAN
Ekstrem I	1295,816	1049,008	372,108	-3776,988	836,206	396,067	11,352			297,085	480,654	AMAN
Ekstrem II	1295,816	1049,008	372,108	-3776,988	836,206	660,112	18,920				455,181	AMAN
Layan I	1079,847	806,930	186,054	-3776,988	1672,412	1320,224	37,839	47,496	79,317		1453,129	AMAN
Layan II	1079,847	806,930	186,054	-3776,988	1672,412	1716,291	49,191		79,317		1813,053	AMAN
Layan III	1079,847	806,930	186,054	-3776,988	1672,412	1056,179	30,271		79,317		1134,021	AMAN
Layan IV	1079,847	806,930	186,054	-3776,988	1672,412				79,317		47,571	AMAN
Fatik						990,168	28,379				1018,547	AMAN

Momen ultimit positif akibat beban (*Mu*+) lebih kecil dari momen ultimit balok prategang ( $\emptyset \cdot M_n = 8313,0990$  kNm), maka desain balok prategang aman terhadap momen akibat kombinasi pembebanan.

## 2. Kombinasi Momen Negatif di Daerah Tumpuan

Kombinasi momen negatif di daerah lapangan dapat dilihat pada Tabel 5.58.

**Tabel 5. 58 Momen Negatif Ultimit Akibat Kombinasi Pembebanan**

Keadaan Batas	MS (Berat Sendiri)		MA Mati Tambahan	PR Prategang	SH Susut Rangkak	TD Lajur "D"	TB Rem	EWL Angin Kendaraan	EUn Temperatur Seragam	EQ	Momen Ultimit	Keterangan
	Pracetak	Cor Ditempat										
Kuat I	2304,687	1865,725	661,816	-2316,787	-43,415	4671,161	115,208		141,070	Gempa	7399,464	AMAN
Kuat II	2304,687	1865,725	661,816	-2316,787	-43,415	3633,125	89,606		141,070		6335,827	AMAN
Kuat III	2304,687	1865,725	661,816	-2316,787	-43,415				141,070		2613,096	AMAN
Kuat IV	2304,687	1865,725	661,816	-2316,787	-43,415				141,070		2613,096	AMAN
Kuat V	2304,687	1865,725	661,816	-2316,787	-43,415			84,474	141,070		2697,569	AMAN
Ekstrem I	2304,687	1865,725	661,816	-2316,787	-43,415	778,527	19,201			528,384	3798,138	AMAN
Ekstrem II	2304,687	1865,725	661,816	-2316,787	-43,415	1297,545	32,002				3801,572	AMAN
Layan I	1920,572	1435,173	330,908	-2316,787	-86,831	2595,089	64,004	84,474	141,070		4167,673	AMAN
Layan II	1920,572	1435,173	330,908	-2316,787	-86,831	3373,616	83,205		141,070		4880,928	AMAN
Layan III	1920,572	1435,173	330,908	-2316,787	-86,831	2076,072	51,203		141,070		3551,381	AMAN
Layan IV	1920,572	1435,173	330,908	-2316,787	-86,831				141,070		1424,106	AMAN
Fatig						1946,317	48,003				1994,320	AMAN

Momen ultimit negatif akibat beban ( $M_u$ ) lebih kecil dari momen ultimit balok prategang ( $\phi \cdot M_n = 7935,8829$  kNm), maka desain balok prategang aman terhadap momen akibat kombinasi pembebanan.

### 5.5.9 Lendutan pada PCI-Girder

Lendutan pada *PCI-Girder* dihitung berdasarkan pada tahap pembebanan dan berdasarkan beban yang terjadi pada *PCI-Girder*.

#### 1. Lendutan Berdasarkan pada Tahap Pembebanan

Tahap-tahap pembebanan pada *PCI-Girder* adalah tahapan saat transfer, tahapan setelah pelat selesai di cor dan tahapan saat *PCI-Girder* dan pelat sudah menjadi komposit. Detail perhitungan lendutan pada setiap tahap pembebanan adalah sebagai berikut.

##### a. Lendutan Saat Transfer

Data yang diperlukan dalam perhitungan lendutan pada saat transfer adalah sebagai berikut.

Modulus elastisitas beton saat transfer,  $E_{ci}=31904193$  kPa

Panjang bentang balok prategang,  $L = 30$  m

Gaya prategang awal,  $P_t = 6399,4637$  kN

Eksentrisitas penampang,  $e_s = 0,4666$  m

Momen inersia penampang,  $I = 0,2364$  m<sup>4</sup>

Beban akibat berat sendiri PCI,  $Q_{bs} = 17,0723$  kN/m

$$\begin{aligned} Q_{pt} &= \frac{8 \cdot P_t \cdot e_s}{L^2} \\ &= \frac{8 \cdot 6399,4637 \cdot 0,4666}{30^2} \\ &= 26,5417 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{5}{185} \left( \frac{(-Q_{pt} + Q_b) \cdot L^4}{E_c \cdot I} \right) \\ &= \frac{5}{185} \left( \frac{(-26,5417 + 17,0723) \cdot 30^4}{31904193 \cdot 0,2364} \right) \\ &= -0,0055 \text{ m} < 0, \text{ maka terjadi } \textit{chamber}. \end{aligned}$$

##### b. Lendutan Setelah Pelat Dicor (Beton Muda)

Data yang diperlukan dalam perhitungan lendutan setelah pelat dicor adalah sebagai berikut.

Modulus elastisitas beton,  $E_c = 35669973$  kPa

Panjang bentang balok prategang,  $L = 30$  m

Gaya prategang efektif,	$P_{eff}$	=5078,1461 kN
Eksentrisitas penampang,	$e_s$	=0,4666 m
Momen inersia penampang,	$I$	=0,2364 m <sup>4</sup>
Beban akibat berat sendiri PCI,	$Q_{bs}$	=17,0723 kN/m
Beban akibat berat <i>slab</i> ,	$Q_{slab}$	=9,25 kN/m
Beban akibat prategang efektif,		

$$Q_{peff} = \frac{8 \cdot P_{eff} \cdot e_s}{L^2}$$

$$= \frac{8 \cdot 5078,1461 \cdot 0,4666}{30^2}$$

$$= 21,0615 \text{ kN/m}$$

Beban akibat berat sendiri+*slab*,

$$Q_{b+slab} = Q_b + Q_{slab}$$

$$= 17,0723 + 9,25$$

$$= 26,3223 \text{ kN/m}$$

$$\delta = \frac{5}{185} \left( \frac{(-Q_{peff} + Q_{b+slab}) \cdot L^4}{E_c \cdot I} \right)$$

$$= \frac{5}{185} \left( \frac{(-21,0615 + 26,3223) \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,2364} \right)$$

$$= 0,0027 \text{ m} > 0, \text{ maka terjadi lendutan.}$$

c. Lendutan Setelah Pelat dan Balok Menjadi Komposit

Data yang diperlukan pada perhitungan lendutan balok komposit adalah sebagai berikut.

Modulus elastisitas beton,	$E_c$	=35669973 kPa
Panjang bentang balok prategang,	$L$	=30 m
Gaya prategang efektif,	$P_{eff}$	=5078,1461 kN
Eksentrisitas penampang komposit,	$e_s$	=0,7438 m
Momen inersia penampang komposit,	$I_c$	=0,4198 m <sup>4</sup>
Beban akibat berat sendiri PCI,	$Q_{bs}$	=17,0723 kN/m
Beban akibat berat <i>slab</i> ,	$Q_{slab}$	=9,25 kN/m
Beban akibat berat PCI dan <i>slab</i> ,	$Q_{b+slab}$	=26,3223 kN/m

$$Q_{peff} = \frac{8 \cdot P_{eff} \cdot e_s}{L^2}$$

$$= \frac{8 \cdot 5078,1461 \cdot 0,7438}{30^2}$$

$$= 33,5732 \text{ kN/m}$$

$$\delta = \frac{5}{185} \left( \frac{(-Q_{peff} + Q_{balok+pelat}) \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right)$$

$$= \frac{5}{185} \left( \frac{(-33,5732 + 26,3223) \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right)$$

$$= -0,0021 \text{ m} < 0, \text{ maka terjadi } chamber.$$

## 2. Lendutan Akibat Beban

Lendutan akibat setiap beban yang bekerja pada gelagar dihitung untuk menentukan lendutan total akibat beban.

Momen inersia *PCI-Girder* komposit,  $I_c = 0,4198 \text{ m}^4$

Modulus elastisitas beton,  $E_c = 35669973 \text{ MPa}$

Berikut ini adalah perhitungan lendutan akibat setiap beban yang bekerja pada gelagar.

### a. Lendutan Akibat Berat Sendiri

Beban merata akibat berat sendiri,  $Q_{MS} = 29,8298 \text{ kN/m}$

$$\delta = \frac{5}{185} \left( \frac{Q_{MS} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right)$$

$$= \frac{5}{185} \left( \frac{29,8298 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right)$$

$$= 0,0087 \text{ m}$$

### b. Lendutan Akibat Beban Mati Tambahan

Beban merata akibat beban mati tambahan,  $Q_{MA} = 2,9415 \text{ kN/m}$

$$\delta = \frac{5}{185} \left( \frac{Q_{MA} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right)$$

$$= \frac{5}{185} \left( \frac{2,9415 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right)$$

$$= 0,00086 \text{ m}$$



## c. Lendutan Akibat Beban Lajur “D”

Beban merata akibat beban lajur “D”,  $Q_{TD} = 16,65 \text{ kN/m}$

Beban titik akibat beban lajur “D”,  $P_{TD} = 126,91 \text{ kN}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{185} \left( \frac{Q_{TD} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) + 0,0098 \left( \frac{P_{TD} \cdot L^3}{E_c \cdot I_{xc}} \right) \\ &= \frac{5}{185} \left( \frac{16,65 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) + 0,0098 \left( \frac{126,91 \cdot 30^3}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0071 \text{ m}\end{aligned}$$

## d. Lendutan Akibat Beban Rem

Beban titik akibat beban rem,  $P_{TB} = 11,25 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= 0,0098 \left( \frac{P_{TB} \cdot L^3}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= 0,0098 \left( \frac{11,25 \cdot 30^3}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0002 \text{ m}\end{aligned}$$

## e. Lendutan Akibat Beban Angin Kendaraan

Beban merata akibat beban angin,  $Q_{EW} = 0,7509 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{185} \left( \frac{Q_{EW} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{185} \left( \frac{0,8901 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0002 \text{ m}\end{aligned}$$

## f. Lendutan Akibat Pengaruh Temperatur Seragam

Beban merata akibat beban angin,  $Q_{EUn} = 1,045 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{185} \left( \frac{Q_{EUn} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{185} \left( \frac{1,045 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0003 \text{ m}\end{aligned}$$

g. Lendutan Akibat Beban Gempa

Beban merata akibat beban gempa,  $Q_{EQ} = 4,6969 \text{ kN/m}$

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{5}{185} \left( \frac{Q_{EQ} \cdot L^4}{E_c \cdot I_c} \right) \\ &= \frac{5}{185} \left( \frac{4,6969 \cdot 30^4}{35669973 \cdot 0,4198} \right) \\ &= 0,0014 \text{ m}\end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan sebelumnya, lendutan masing-masing beban dapat dilihat pada Tabel 5.59.

**Tabel 5. 59 Rekapitulasi Lendutan pada Balok**

No.	Jenis Beban		Lendutan	Keterangan
Lendutan berdasarkan tahap pembebanan				
1	Saat transfer		-0,00550	<i>Chamber</i>
2	Setelah pelat selesai di cor		0,00273	<i>Deflection</i>
3	Setelah menjadi komposit		-0,00212	<i>Chamber</i>
Lendutan akibat beban				
1	Berat sendiri	<i>MS</i>	0,00872	<i>Deflection</i>
2	Beban mati tambahan	<i>MA</i>	0,00086	<i>Deflection</i>
3	Beban Lajur "D"	<i>TD</i>	0,00711	<i>Deflection</i>
4	Gaya rem	<i>TB</i>	0,00020	<i>Deflection</i>
5	Beban angin	<i>EW</i>	0,00022	<i>Deflection</i>
6	Temperatur Seragam	<i>EUn</i>	0,00031	<i>Deflection</i>
7	Beban gempa	<i>EQ</i>	0,00137	<i>Deflection</i>
Lendutan total			0,01879	m

Lendutan maksimum yang diijinkan adalah sebagai berikut.

$$\delta = \frac{L}{240} = 0,1275 \text{ m} > \text{Lendutan total } \delta = 0,01879 \text{ m}$$

Maka, desain gelagar prategang aman terhadap lendutan yang terjadi akibat beban.

#### 5.5.10 Tulangan Geser Balok Prategang

Dalam proses desain tulangan geser, hasil perhitungan gaya geser tiap pembebanan yang sudah dihitung pada Tabel 5.31 dikalikan dengan faktor beban ultimit dan dikombinasi beban sesuai dengan SNI-1725-2016 (2016). Dari semua kombinasi, dipilih kombinasi yang menghasilkan gaya geser terbesar untuk dipakai

dalam perhitungan tulangan geser. Kombinasi terbesar yang digunakan untuk perhitungan tulangan geser adalah kombinasi “Kuat I”.

Perhitungan tulangan geser balok prategang adalah sebagai berikut.

Gaya prategang efektif,  $P_{eff} = 5078,1461 \text{ kN}$

Kuat tekan beton,  $f'_c = 41,5 \text{ MPa}$

Luas penampang PCI,  $A = 0,6695 \text{ m}^2$

Lebar penampang *PCI-Girder*,  $b_w = 0,2 \text{ m}$

Luas penampang *PCI* tumpuan,  $A_{tump} = 1,3220 \text{ m}^2$

Lebar penampang *PCI-Girder* tumpuan,  $b_w = 0,7 \text{ m}$

Tinggi efektif *PCI-Girder* lapangan,  $d = 1,35 \text{ m}$

Tinggi efektif *PCI-Girder* tumpuan,  $d = 1,55 \text{ m}$

Kekuatan geser maksimum dari tulangan,

$$\begin{aligned} V_{s \max} &= \frac{2}{3} \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_w \cdot d \\ &= \frac{2}{3} \cdot \sqrt{41,5} \cdot 200 \cdot 1350 \cdot 10^{-3} \\ &= 1159,5689 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tegangan leleh tulangan,  $f_y = 400 \text{ MPa}$

Diameter tulangan geser,  $D = 13 \text{ mm}$

Jenis tulangan geser,  $n = 2 \text{ kaki}$

Luas 1 tulangan geser,

$$\begin{aligned} A_v &= n \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 \\ &= 2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 \\ &= 265,4646 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Kekuatan geser dari beton di tumpuan,

$$\begin{aligned} V_c &= \left( 1 + \frac{0,3 \cdot N_u}{A_g} \right) \cdot \frac{\sqrt{f'_c}}{6} \cdot b_w \cdot d \\ &= \left( 1 + \frac{0,3 \cdot 5078,1461}{1322000} \right) \cdot \frac{\sqrt{41,5}}{6} \cdot 700 \cdot 1550 \cdot 10^{-3} \\ &= 2507,3854 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kekuatan geser dari beton di lapangan,

$$\begin{aligned} V_c &= \left(1 + \frac{0,3 \cdot N_u}{A_g}\right) \cdot \frac{\sqrt{f_c}}{6} \cdot b_w \cdot d \\ &= \left(1 + \frac{0,3 \cdot 5078,1461}{669500}\right) \cdot \frac{\sqrt{41,5}}{6} \cdot 200 \cdot 1350 \cdot 10^{-3} \\ &= 949,5405 \text{ kN} \end{aligned}$$

Berdasarkan RSNI T-02-2004, faktor reduksi geser adalah  $\phi=0,7$ . Berikut ini adalah perhitungan tulangan geser pada jarak 3 m dari tumpuan.

Kekuatan geser dari tulangan geser yang diperlukan,

$$\begin{aligned} V_s &= V_u / \phi - V_c \\ &= 1167,8915 / 0,7 - 949,5405 \\ &= 718,8759 \text{ kN} < V_{s \max} = 1159,5689 \text{ kN} \quad \text{OK} \end{aligned}$$

$V_s < \frac{1}{3} \cdot \sqrt{f_c} \cdot b_w \cdot d = 579,7844 \text{ kN}$ , maka berdasarkan RSNI T-02-2004, jarak antar tulangan geser maksimum adalah sebagai berikut.

$$s_{\max} = \frac{d}{2} = \frac{1350}{2} = 675 \text{ mm}; \text{ atau}$$

$$s_{\max} = 600 \text{ mm},$$

maka digunakan  $s_{\max} = 600 \text{ mm}$ .

Jarak antar tulangan geser yang diperlukan,

$$\begin{aligned} s &= \frac{A_v f_y \cdot d}{V_s} \\ &= \frac{265,4646 \cdot 400 \cdot 1350}{718,8759} \\ &= 228,95 \text{ mm digunakan } s = 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$s < s_{\max} = 600 \text{ mm} \quad \text{OK}$$

Tulangan geser pada jarak 3-4 m dari tumpuan menggunakan tulangan geser 2-D13-150. Perhitungan pada jarak yang lain dilakukan dengan prosedur yang sama. Rekapitulasi hasil perhitungan tulangan geser balok prategang dapat dilihat pada Tabel 5.60.

**Tabel 5. 60 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Tulangan Geser**

<i>x</i> m	<i>Vu</i> kN	<i>Vu/Ø</i> kN	<i>Vc</i> kN	<i>Vs</i> kN	<i>S</i> mm	<i>S pakai</i> mm	Keterangan
0	1639,12	2341,59	2507,39	-165,79	-992,74	150	2-D13-150
1	1564,94	2235,62	2507,39	-271,76	-605,63	150	2-D13-150
1	1316,25	1880,35	2507,39	-627,03	-262,49	150	2-D13-150
2	1242,07	1774,39	2507,39	-733,00	-224,54	150	2-D13-150
3	1167,89	1668,42	949,54	718,8759	228,95	150	2-D13-150
4	1093,71	1562,45	949,54	612,91	268,54	150	2-D13-150
5	1019,53	1456,48	949,54	506,94	324,67	300	2-D13-300
6	945,36	1350,51	949,54	400,97	410,48	300	2-D13-300
7	871,18	1244,54	949,54	295,00	557,93	300	2-D13-300
8	797,00	1138,57	949,54	189,03	870,69	300	2-D13-300
9	722,82	1032,60	949,54	83,06	1981,56	600	2-D13-600
10	648,64	926,63	949,54	-22,91	-7184,59	600	2-D13-600
11	574,46	820,66	949,54	-128,88	-1277,07	600	2-D13-600
12	500,29	714,69	949,54	-234,85	-700,83	600	2-D13-600
13	426,11	608,72	949,54	-340,82	-482,92	600	2-D13-600
14	351,93	502,76	949,54	-446,79	-368,38	600	2-D13-600
15	277,75	396,78	949,54	-552,76	-297,76	600	2-D13-600

Berdasarkan hasil perhitungan tulangan geser pada Tabel 5.59, dapat dihitung jumlah tulangan geser yang diperlukan pada seluruh gelagar jembatan. Berikut ini adalah perhitungan jumlah tulangan pada gelagar jembatan.

1. Jumlah tulangan geser pada bentang 0 m sampai 5 m.

Jarak tulangan geser pada bentang 0 m sampai 5 m adalah 150 mm, sehingga jumlah tulangan yang digunakan pada bentang tersebut adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n_1 &= \frac{L_2 - L_1}{s} \\
 &= \frac{5-0}{150 \cdot 10^{-3}} \\
 &= 33,33 \approx 34 \text{ tulangan geser}
 \end{aligned}$$

2. Jumlah tulangan geser pada bentang 5 m sampai 9 m.

Jarak tulangan geser pada bentang 5 m sampai 9 m adalah 300 mm, sehingga jumlah tulangan yang digunakan pada bentang tersebut adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n_2 &= \frac{L_2 - L_1}{s} \\
 &= \frac{9-5}{300 \cdot 10^{-3}} \\
 &= 13,33 \approx 14 \text{ tulangan geser}
 \end{aligned}$$

3. Jumlah tulangan geser pada bentang 9 sampai 15 m.

Jarak tulangan geser pada bentang 9 m sampai 15 m adalah 600 mm, sehingga jumlah tulangan yang digunakan pada bentang tersebut adalah sebagai berikut.

$$n_3 = \frac{L_2 - L_1}{s}$$

$$= \frac{15 - 9}{600 \cdot 10^{-3}}$$

=10 tulangan geser.

Perhitungan tersebut untuk 1/2 bentang jembatan, dimana pada Jembatan Sambiroto terdapat 2 bentang gelagar dengan 5 baris *PCI-Girder*. Maka, jumlah keseluruhan tulangan geser adalah sebagai berikut.

$$n_t = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 + n_5) \cdot 5$$

$$= (34 + 14 + 10) \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5$$

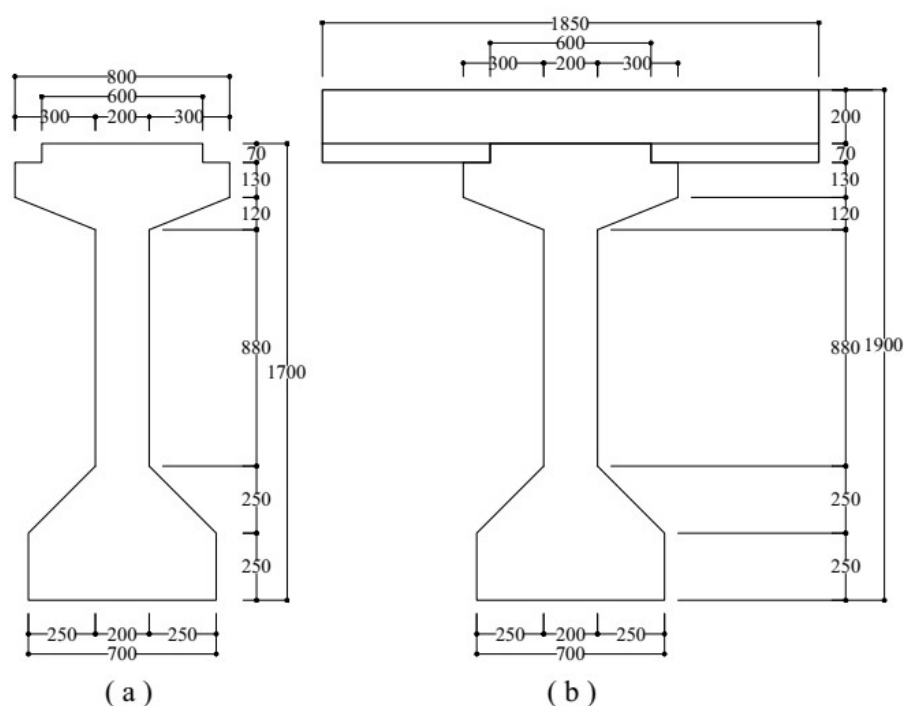
$$= 1160 \text{ tulangan geser}$$

## 5.6 Rekapitulasi Hasil Perhitungan

Berikut ini adalah rekapitulasi hasil perhitungan yang meliputi *section properties*, momen akibat pembebanan, tegangan, momen ultimit, dan lendutan.

### 1. *Section Properties* Balok Prategang

*Section properties* PCI-Girder yang digunakan pada desain balok prategang dapat dilihat pada Tabel 5.61 dengan detail penampang dapat dilihat pada Gambar 5.74.



Gambar 5. 74 Penampang Melintang (a) *PCI-Girder* Non-Komposit dan (b) *PCI-Girder* Komposit

Tabel 5. 61 Rekapitulasi *Section Properties* Balok Sederhana dan Balok Menerus

Tinjauan	Notasi	Non-Komposit	Komposit	Satuan
Luas penampang balok	$A$	0,6695	0,9323	m <sup>2</sup>
Titik berat balok	$y_a$	0,8834	0,8062	m
	$y_b$	0,8166	1,0938	m
Momen inersia balok	$I_x$	0,2364	0,4198	m <sup>4</sup>
Modulus penampang	$S_a$	-	0,5207	m <sup>3</sup>
	$S_a'$	0,2676	0,6924	m <sup>3</sup>
	$S_b$	0,2895	0,3838	m <sup>3</sup>

## 2. Momen dan Gaya Geser Akibat Beban

Berdasarkan hasil perhitungan momen pada Sub Bab 5.2.2 dan 5.3.2 momen dan gaya geser yang didapatkan pada setiap beban yang bekerja dapat dilihat pada Tabel 5.62 dan Tabel 5.63.

**Tabel 5. 62 Rekapitulasi Momen Maksimum Akibat Beban**

Momen	Notasi	Balok Sederhana	Balok Menerus		Satuan
		Lapangan	Lapangan	Tumpuan	
Beban balok	<i>bs</i>	1920,628	1079,847	-1920,572	kNm
Beban pelat	<i>pelat</i>	1040,625	585,075	-1040,592	kNm
Beton cor ditempat	<i>cor</i>	1435,219	806,930	-1435,173	kNm
Berat sendiri	<i>MS</i>	3355,847	1886,776	-3355,745	kNm
Beban mati tambahan	<i>MA</i>	330,919	186,054	-330,908	kNm
Beban lajur "D"	<i>TD</i>	2824,950	1320,224	-2595,089	kNm
Beban rem	<i>TB</i>	84,375	37,839	-64,004	kNm
Beban angin	<i>EWL</i>	84,471	47,496	-84,474	kNm
Temperatur seragam	<i>EUn</i>	117,563	66,098	-117,559	kNm
Beban gempa	<i>EQ</i>	528,406	297,085	-528,384	kNm

**Tabel 5. 63 Rekapitulasi Gaya Geser Maksimum Akibat Beban**

Momen	Notasi	Balok Sederhana	Balok Menerus	Satuan
Beban balok	<i>bs</i>	256,085	320,104	kNm
Beban pelat	<i>pelat</i>	138,750	173,436	kNm
Beton cor ditempat	<i>cor</i>	191,362	239,201	kNm
Berat sendiri	<i>MS</i>	447,447	559,305	kNm
Beban mati tambahan	<i>MA</i>	44,123	55,153	kNm
Beban lajur "D"	<i>TD</i>	372,430	438,886	kNm
Beban rem	<i>TB</i>	10,875	11,231	kNm
Beban angin	<i>EWL</i>	11,264	14,079	kNm
Temperatur seragam	<i>EUn</i>	15,675	19,594	kNm
Beban gempa	<i>EQ</i>	70,454	88,066	kNm

## 3. Gaya Prategang, Eksentrisitas dan Jumlah *Strands*

Rekapitulasi gaya prategang, eksentrisitas dan jumlah *strands* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.64.



**Tabel 5. 64 Rekapitulasi Gaya Prategang, Eksentrisitas dan Jumlah Strands**

Tinjauan	Notasi	Balok Sederhana	Balok Menerus		Satuan
		Lapangan	Lapangan	Tumpuan	
Eksentrisitas <i>PCI-Girder</i> non-komposit	<i>es</i>	0,6666	0,4666	0,7334	m
Eksentrisitas <i>PCI-Girder</i> komposit	<i>es c</i>	0,9438	0,7438	0,4562	m
Gaya prategang awal	<i>Pt</i>	6995,018	6399,4637		kN
Jumlah <i>strands</i>	<i>n</i>	56	52		buah
Gaya prategang efektif	<i>Pe<sub>eff</sub></i>	5646,410	5078,1461		kN
Gaya geser maksimum	<i>V<sub>u</sub></i>	1353,078	1639,116		kN
Jumlah tulangan geser	<i>n</i>	1060	1160		buah

## 4. Tegangan

Rekapitulasi tegangan akibat pembebanan pada desain balok sederhana dan balok menerus dapat dilihat pada Tabel 5.65.

**Tabel 5. 65 Rekapitulasi Tegangan Akibat Kombinasi Pembebanan**

Kombinasi	Letak	Balok Sederhana			Balok Menerus					
		Tegangan	Teg ijin	Ket	Lapangan			Tumpuan		
					Tegangan	Teg ijin	Ket	Tegangan	Teg ijin	Ket
Kuat I	<i>fac</i>	-11,91	18,68	AMAN	-7,55	18,68	AMAN	-1,33	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-5,63	18,68	AMAN	-7,71	18,68	AMAN	-15,59	18,68	AMAN
Kuat II	<i>fac</i>	-11,91	18,68	AMAN	-7,55	18,68	AMAN	-1,33	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-5,63	18,68	AMAN	-7,71	18,68	AMAN	-15,59	18,68	AMAN
Kuat III	<i>fac</i>	-6,32	18,68	AMAN	-4,94	18,68	AMAN	-6,44	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-13,21	18,68	AMAN	-11,25	18,68	AMAN	-8,66	18,68	AMAN
Kuat IV	<i>fac</i>	-6,32	18,68	AMAN	-4,94	18,68	AMAN	-6,44	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-13,21	18,68	AMAN	-11,25	18,68	AMAN	-8,66	18,68	AMAN
Kuat V	<i>fac</i>	-6,49	18,68	AMAN	-5,03	18,68	AMAN	-6,28	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-12,99	18,68	AMAN	-11,13	18,68	AMAN	-8,88	18,68	AMAN
Ekstrem I	<i>fac</i>	-12,70	18,68	AMAN	-8,00	18,68	AMAN	-0,55	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-4,56	18,68	AMAN	-7,11	18,68	AMAN	-16,66	18,68	AMAN
Ekstrem II	<i>fac</i>	-11,69	18,68	AMAN	-7,42	18,68	AMAN	-1,56	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-5,94	18,68	AMAN	-7,88	18,68	AMAN	-15,28	18,68	AMAN
Layan I	<i>fac</i>	-12,07	18,68	AMAN	-7,64	18,68	AMAN	-1,17	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-5,41	18,68	AMAN	-7,59	18,68	AMAN	-15,81	18,68	AMAN
Layan II	<i>fac</i>	-11,91	18,68	AMAN	-7,55	18,68	AMAN	-1,33	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-5,63	18,68	AMAN	-7,71	18,68	AMAN	-15,59	18,68	AMAN
Layan III	<i>fac</i>	-11,91	18,68	AMAN	-7,55	18,68	AMAN	-1,33	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-5,63	18,68	AMAN	-7,71	18,68	AMAN	-15,59	18,68	AMAN
Layan IV	<i>fac</i>	-6,32	18,68	AMAN	-4,94	18,68	AMAN	-6,44	18,68	AMAN
	<i>bbc</i>	-13,21	18,68	AMAN	-11,25	18,68	AMAN	-8,66	18,68	AMAN

## 5. Momen ultimit

Rekapitulasi momen ultimit ( $M_u$ ) momen ultimit balok ( $\phi M_n$ ) dapat dilihat pada Tabel 5.66.

**Tabel 5. 66 Rekapitulasi Momen Ultimit Balok Prategang**

Kombinasi Beban	Balok Sederhana			Balok Menerus					
				Lapangan			Tumpuan		
	$M_u$	$\phi M_n$	Ket	$M_u$	$\phi M_n$	Ket	$M_u$	$\phi M_n$	Ket
Kuat I	5862,52	10131,81	AMAN	2299,98	8313,10	AMAN	7399,46	7935,88	AMAN
Kuat II	4698,79	10131,81	AMAN	1756,75	8313,10	AMAN	6335,83	7935,88	AMAN
Kuat III	625,74	10131,81	AMAN	-144,53	8313,10	AMAN	2613,10	7935,88	AMAN
Kuat IV	625,74	10131,81	AMAN	-144,53	8313,10	AMAN	2613,10	7935,88	AMAN
Kuat V	710,21	10131,81	AMAN	-97,04	8313,10	AMAN	2697,57	7935,88	AMAN
Ekstrem I	1885,87	10131,81	AMAN	480,65	8313,10	AMAN	3798,14	7935,88	AMAN
Ekstrem II	1939,32	10131,81	AMAN	455,18	8313,10	AMAN	3801,57	7935,88	AMAN
Layan I	3455,14	10131,81	AMAN	1453,13	8313,10	AMAN	4167,67	7935,88	AMAN
Layan II	4243,47	10131,81	AMAN	1813,05	8313,10	AMAN	4880,93	7935,88	AMAN
Layan III	2788,80	10131,81	AMAN	1134,02	8313,10	AMAN	3551,38	7935,88	AMAN
Layan IV	461,34	10131,81	AMAN	47,57	8313,10	AMAN	1424,11	7935,88	AMAN
Fatik	2181,99	10131,81	AMAN	1018,55	8313,10	AMAN	1994,32	7935,88	AMAN

## 6. Lendutan

Berdasarkan perhitungan lendutan pada balok sederhana dan balok menerus pada sub bab 5.2.10 dan 5.3.10, rekapitulasi lendutan dapat dilihat pada Tabel 5.67.

**Tabel 5. 67 Rekapitulasi Lendutan pada 3 Desain Balok Prategang**

No.	Jenis Beban	Balok Sederhana		Balok Menerus	
		Lendutan	Keterangan	Lendutan	Keterangan
Lendutan Berdasarkan Tahap Pembebanan					
1	Saat transfer	-0,0341	Chamber	-0,00550	Chamber
2	Setelah pelat selesai di cor	-0,0089	Chamber	0,00273	Deflection
3	Setelah menjadi komposit	-0,0148	Chamber	-0,00212	Chamber
Lendutan Akibat Beban					
1	Berat sendiri	$MS$	0,0210	Deflection	0,00872
2	Beban mati tambahan	$MA$	0,0021	Deflection	0,00086
3	Beban Lajur "D"	$TD$	0,0165	Deflection	0,00711
4	Gaya rem	$TB$	0,0004	Deflection	0,00020
5	Beban angin	$EW$	0,0005	Deflection	0,00022
6	Temperatur seragam	$EU_n$	0,0007	Deflection	0,00031
7	Beban gempa	$EQ$	0,0033	Deflection	0,00137
Lendutan total =			0,0446	m	0,01879
					m

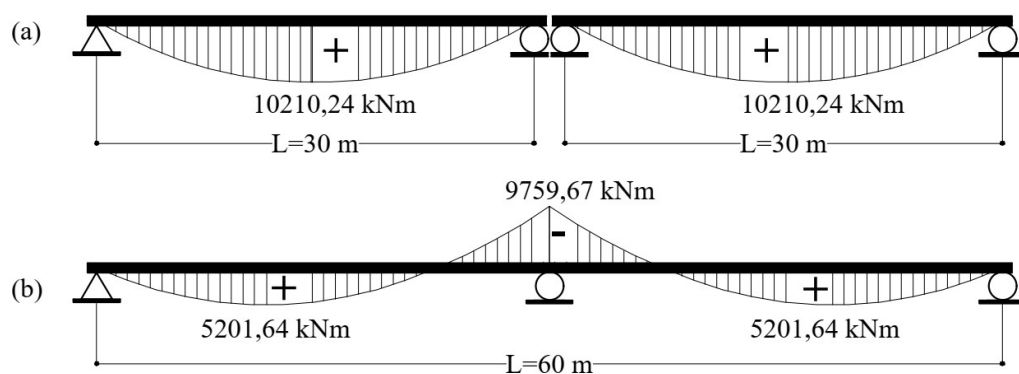
## 5.7 Pembahasan

Berikut adalah pembahasan dari hasil yang telah didapatkan dari perhitungan. Pembahasan meliputi momen, tegangan, momen ultimit, lendutan, dan hasil desain struktur balok sederhana dan balok menerus.

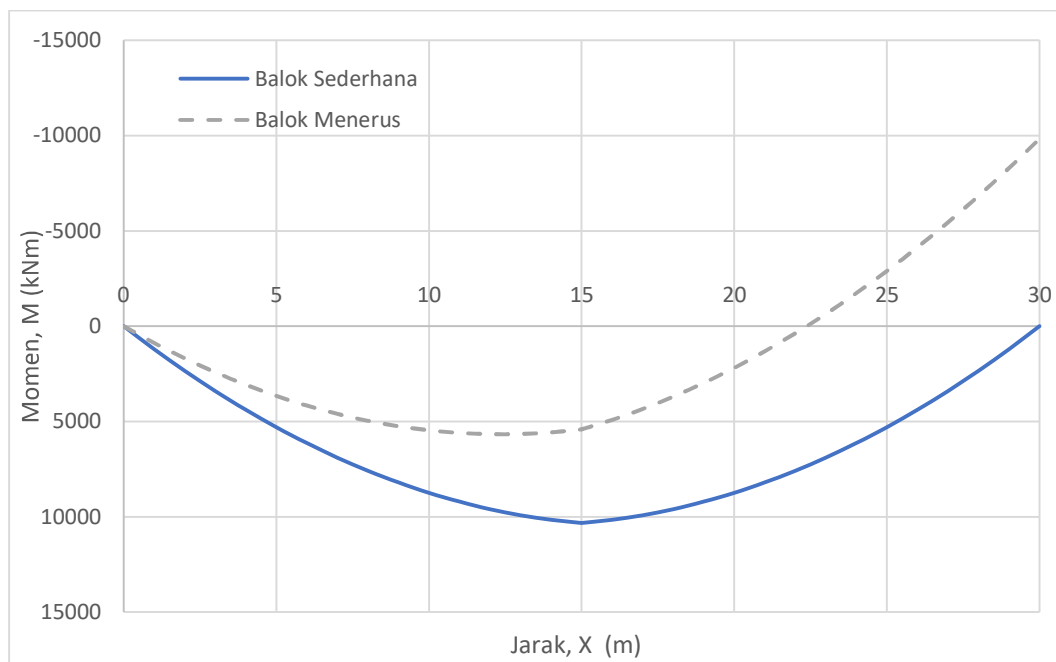
### 5.7.1 Momen dan Gaya Geser

#### 1. Momen

Berdasarkan hasil perhitungan pada Sub Bab 5.4.1 dan 5.5.1 didapatkan kombinasi pembebanan terbesar terjadi pada kombinasi “Kuat I”. Untuk mengetahui perbedaan momen pada struktur balok sederhana dan struktur balok menerus, dibuat diagram dan grafik momen kombinasi “Kuat 1” yang dapat dilihat pada Gambar 5.75 dan Gambar 5.76.



**Gambar 5. 75 Diagram Momen (a) Balok Sederhana, (b) Balok Menerus**

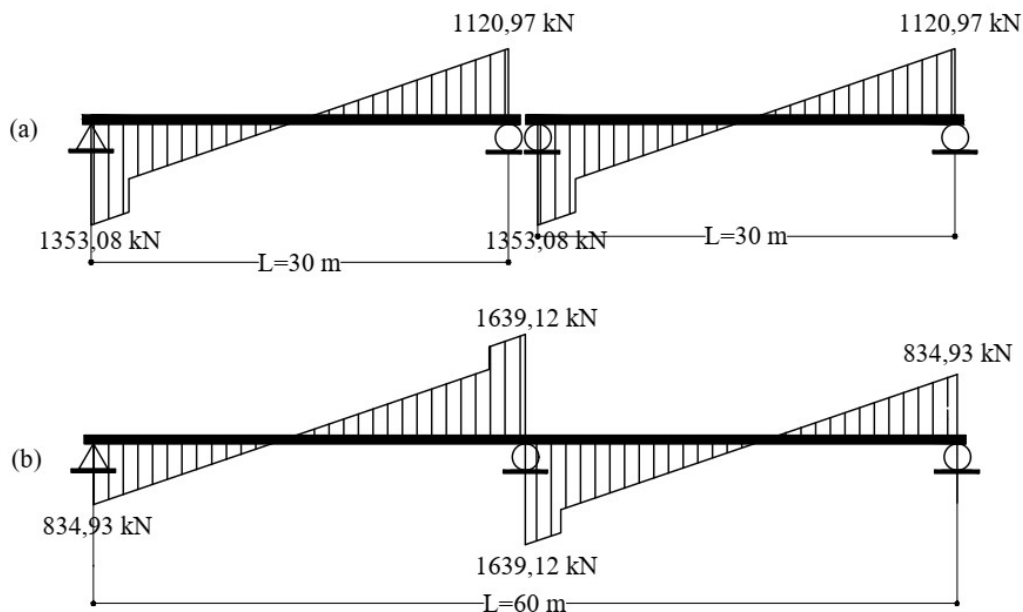


**Gambar 5. 76 Grafik Momen Kombinasi “Kuat 1” pada Balok Sederhana dan Balok Menerus**

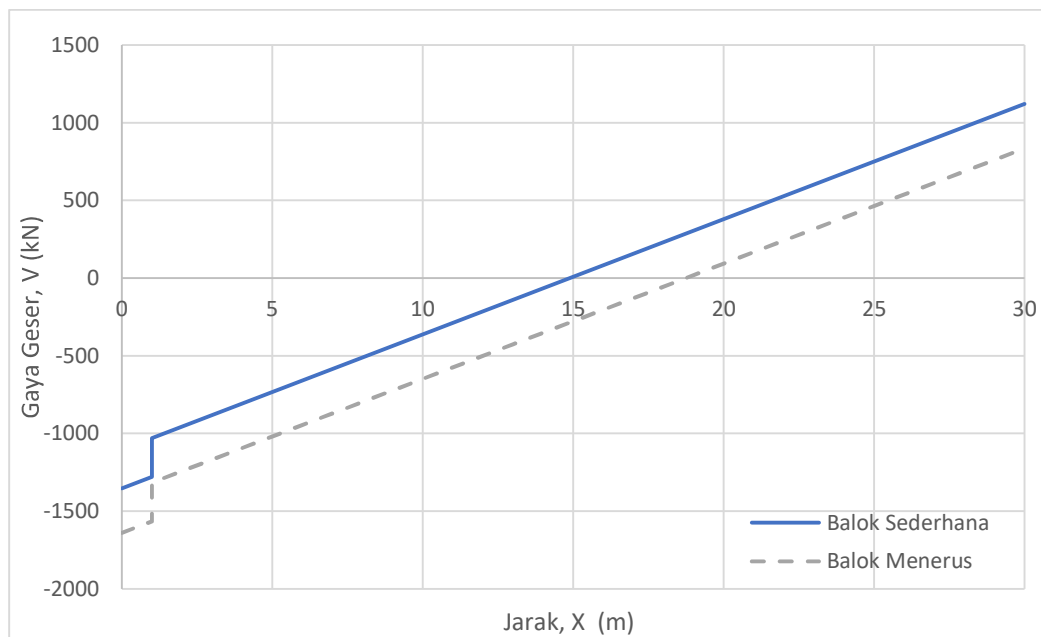
Menurut Nawy (2001), dengan menggunakan balok menerus, akan terjadi reduksi momen dan tegangan pada daerah lapangan. Berdasarkan grafik momen pada Gambar 5.75, balok menerus menghasilkan momen positif sebesar 5201,64 kNm di daerah lapangan yang jauh lebih kecil dari pada momen positif pada desain balok sederhana yaitu sebesar 10210,24 kNm. Pada balok menerus, di tumpuan terjadi momen negatif sebesar 9757,67 kNm dimana memiliki nilai yang juga lebih kecil dibanding momen positif pada struktur balok sederhana. Artinya, momen positif pada balok menerus tereduksi, seperti yang dikemukakan oleh Nawy (2001).

## 2. Gaya Geser

Berdasarkan hasil perhitungan pada Sub Bab 5.4.1 dan 5.5.1 didapatkan kombinasi pembebanan terbesar terjadi pada kombinasi “Kuat I”. Untuk mengetahui perbedaan gaya geser pada struktur balok sederhana dan struktur balok menerus, diagram dan grafik gaya geser kombinasi “Kuat 1” yang dapat dilihat pada Gambar 5.77 dan Gambar 5.78.



**Gambar 5. 77 Diagram Gaya Geser (a) Balok Sederhana, (b) Balok Menerus**



**Gambar 5. 78 Grafik Gaya Geser Kombinasi “Kuat 1” pada Balok Sederhana dan Balok Menerus**

Berdasarkan Gambar 5.77, desain balok sederhana memiliki gaya geser maksimum  $1353,08\text{ kN}$ . Pada desain balok menerus gaya geser pada tumpuan tepi adalah sebesar  $834,93\text{ kN}$  sedangkan pada tumpuan tengah adalah  $1639,12$

kN. Gaya geser maksimum pada balok menerus lebih besar dibanding pada balok sederhana pada tumpuan tepi.

### 5.7.2 Tegangan

Berdasarkan rekapitulasi tegangan akibat kombinasi pembebanan pada Tabel 5.65, tegangan pada desain struktur balok sederhana dan balok menerus mendapatkan hasil tegangan yang tidak melebihi tegangan ijin. Maka desain balok prategang aman terhadap tegangan.

### 5.7.3 Momen Ultimit

Berdasarkan rekapitulasi momen ultimit pada Tabel 5.66, semua desain memiliki momen ultimit balok ( $\phi M_n$ ) yang lebih besar dari pada  $M_u$  pada semua kombinasi pembebanan. Maka semua desain balok prategang aman terhadap momen ultimit.

### 5.7.4 Lendutan

Berdasarkan Tabel 5.67, lendutan pada balok menerus lebih kecil dari pada lendutan pada balok sederhana. Hasil yang didapatkan sesuai dengan yang dikemukakan Nawy (2001) yaitu balok menerus akan memiliki defleksi yang lebih kecil dibandingkan balok yang ditumpu sederhana.

### 5.7.5 Perbandingan Hasil Desain

Hasil desain yang dibandingkan dalam penelitian ini adalah jumlah strands dan jumlah tulangan geser.

#### 1. Perbandingan Jumlah *Strands*

Jumlah *strands* yang digunakan pada balok sederhana adalah sebanyak 56 buah sedangkan pada balok menerus adalah 52 buah. Jumlah *strands* yang digunakan pada desain balok menerus 7% lebih sedikit daripada *strands* pada balok sederhana, sehingga desain balok menerus dengan bentang 30 m lebih hemat dalam hal penggunaan material dibanding balok sederhana.

Penggunaan *strands* yang lebih sedikit pada balok menerus disebabkan karena gaya prategang pada balok menerus lebih kecil dibanding gaya prategang pada balok sederhana. Gaya prategang pada desain gelagar balok sederhana adalah

$P_t=6995,02$  kN, sedangkan pada gelagar balok menerus adalah sebesar  $P_t=6399,46$  kN.

## 2. Perbandingan Jumlah Tulangan Geser

Jumlah tulangan geser yang digunakan pada gelagar prategang balok sederhana adalah sebanyak 1060 buah, sedangkan pada balok menerus adalah sebanyak 1160 buah. Dengan menggunakan struktur balok menerus, jumlah tulangan geser yang digunakan lebih banyak 9% dibanding struktur balok sederhana. Penggunaan tulangan yang lebih banyak pada balok menerus disebabkan oleh gaya geser yang lebih besar pada balok menerus dibanding balok sederhana. Gaya geser maksimum pada balok sederhana adalah  $V_u=1353,08$  kN sedangkan pada balok menerus adalah  $V_u=1639,12$  kN.

Lin dan Burns (2000b) menyatakan, dua kali beban pada balok sederhana dapat dipikul oleh bentang menerus dengan jumlah beton dan baja yang sama. Karena maksud dari pendapat tersebut adalah penghematan dalam penggunaan material pada struktur balok menerus, maka hasil yang didapatkan dalam penelitian ini sesuai dengan pendapat Lin dan Burns (2000b) dalam penggunaan *strand*, tetapi tidak sesuai dalam penggunaan material tulangan geser.