

**TUGAS AKHIR**

**PERBANDINGAN TIPE *BOX GIRDER PRESTRESSED*  
TRAPESIUM DAN PERSEGI PADA GELAGAR  
JEMBATAN GREMBYANGAN BENTANG 80 METER  
PENGHUBUNG KEPANEWON BERBAH DAN  
PRAMBANAN  
(*COMPARISON OF TRAPEZOIDAL AND SQUARE  
PRESTRESSED BOX GIRDER TYPE ON  
GREMBYANGAN BRIDGE GIRDER SPAN 80 METERS  
CONNECTING KEPANEWON BERBAH AND  
PRAMBANAN*)**

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**Rizkita Annafi' Hanifah  
18511272**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
2022**

**TUGAS AKHIR**

**PERBANDINGAN TIPE *BOX GIRDER PRESTRESSED*  
TRAPESIUM DAN PERSEGI PADA GELAGAR  
JEMBATAN GREMBYANGAN BENTANG 80 METER  
PENGHUBUNG KEPANEWON BERBAH DAN  
PRAMBANAN  
(*COMPARISON OF TRAPEZOIDAL AND SQUARE  
PRESTRESSED BOX GIRDER TYPE ON  
GREMBYANGAN BRIDGE GIRDER SPAN 80 METERS  
CONNECTING KEPANEWON BERBAH AND  
PRAMBANAN*)**

Disusun oleh

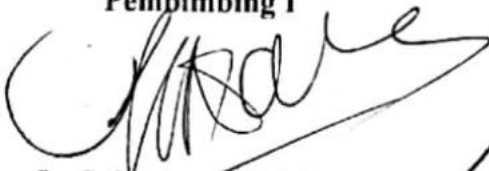
**Rizkita Annafi' Hanifah**  
18511272

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 28 Oktober 2022

Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing I



Ir. Suharyatma, M.T  
NIK: 865110201

Penguji I



Malik Mushthofa, S.T., M.Eng  
NIK: 185111302

Penguji II

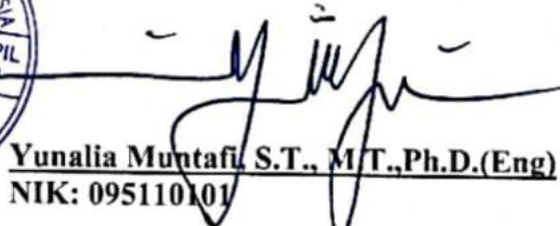


Astriaana Hardawati, S.T., M.Eng  
NIK: 165111301

Mengesahkan,



Ketua Program Studi Teknik Sipil

  
Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D.(Eng)  
NIK: 095110101

## KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul *Perbandingan Tipe Box Girder Prestressed Trapesium Dan Persegi Pada Gelagar Jembatan Grembyangan Bentang 80 Meter Penghubung Kepanewon Berbah Dan Prambanan*. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, diucapkan terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Bapak Ir. Suharyatma, M.T selaku Dosen Pembimbing,
2. Ibu Yunalia Muntafi., S.T, M.T, Ph.D. Eng. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia,
3. Kedua orang tua penulis yang telah berkorban baik secara moril maupun material,
4. Seluruh teman-teman Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.

Akhirnya, Tugas Akhir ini diharapkan bermanfaat bagi pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 28 Oktober 2022

Penulis,

Rizkita Annafi' Hanifah

18 511 272

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 28 Oktober 2022

Yang membuat pernyataan,



Rizkita Annafi' Hanifah

(18511272)

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
<i>ABSTRACT</i>	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Kajian Penelitian Terdahulu	4
2.1.1 Studi Perbandingan Penggunaan Gelagar Beton Prategang Tipe I Dan U Pada Jembatan Bentang Menengah	4
2.1.2 Studi Perbandingan Desain Struktur Atas Jembatan Siak I Menggunakan <i>Prestressed Concrete Box Girder Prismatic</i> dan <i>Non-Prismatic</i> .	5
2.1.3 Studi Perbandingan Penggunaan PCU Girder Dan PCI Girder pada Struktur Atas Jembatan Jurang Gempal, Wonogiri	5

2.1.4	Analisis Struktur Jembatan Cisomang dengan Menggunakan <i>Single Box Girder</i> dan <i>Multibox Girder</i> .	6
2.1.5	Perbandingan Desain Struktur Balok Sederhana Bentang 50 Meter Menggunakan <i>Prestressed Concrete T Girder</i> dan <i>Prestressed Concrete Box Girder</i> .	7
	Perbandingan Desain Struktur Balok Sederhana Bentang 50 Meter Menggunakan <i>Prestressed Concrete T Girder</i> dan <i>Prestressed Concrete Box Girder</i> .	8
<b>BAB III LANDASAN TEORI</b>		11
3.1	Konstruksi Jembatan	11
3.1.1	Konstruksi Bangunan Atas ( <i>Superstructure</i> )	11
3.2	Konstruksi Bangunan Bawah ( <i>Substructure</i> )	15
3.2.1	Landasan dan Pondasi Jembatan	15
3.3	Beton Prategang	16
3.3.1	Konsep Dasar Tegangan Beton Prategang	16
3.3.2	Tegangan pada Beton Prategang	16
3.3.3	Tegangan pada Beton Prategang	19
3.3.4	Tata Letak Tendon ( <i>Layout Tendon</i> )	19
3.3.5	Kehilangan Gaya Prategang ( <i>Lost of Prestress</i> )	21
3.4	Baja Prategang	24
3.5	Keuntungan dan Kerugian Beton Prategang	25
3.6	Pembebanan	25
3.6.1	Beban Permanen	25
3.6.2	Beban Lalu Lintas	27
3.6.3	Beban Akibat Aksi Lingkungan	29
3.6.4	Beban Akibat Gempa	31

3.7	Lendutan (Deflection) dan Chamber	31
BAB IV METODE PENELITIAN		32
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		41
5.1	Data Teknis dan Material Jembatan	41
5.2	Perencanaan Box Girder Prestressed	43
5.2.1	Mencari Tinggi <i>Box</i>	44
5.2.2	Properties Penampang <i>Box</i>	44
5.2.3	Perhitungan Pembebanan Balok Prategang	48
5.2.4	Perhitungan Gaya dan Tendon Prategang	56
5.2.5	<i>Loss of Prestress</i> (Kehilangan Gaya Prategang)	83
5.2.6	Tegangan Pada <i>Box Girder</i>	89
5.2.7	Momen Ultimit Pada <i>Box Girder</i>	100
5.2.8	Lendutan Pada <i>Box Girder</i>	105
5.2.9	Perhitungan Angkur ( <i>End Block</i> )	108
5.2.10	Penulangan <i>Box Girder</i>	111
5.3	Hasil dan Pembahasan	118
5.3.1	Dimensi Penampang dan Tendon Prategang	118
5.3.2	<i>Loss of Prestress</i> (Kehilangan Gaya Prategang)	119
5.3.3	Lendutan	123
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN		124
6.1	Kesimpulan	124
6.2	Saran	124
DAFTAR PUSTAKA		125



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Literatur Penelitian Terdahulu	8
Tabel 3.1 Tipe – Tipe Jembatan	12
Tabel 3.2 Koefisien <i>Wobble</i> dan Koefisien Gesek Kelengkungan	22
Tabel 3.3 Berat Isi Untuk Beban Mati	26
Tabel 3.4 Faktor Beban Akibat Susut dan Rangkak	27
Table 3.5 Faktor Beban Akibat Pengaruh Prategang	27
Tabel 3.6 Faktor Beban untuk Beban “T”	28
Tabel 3.7 Tekanan Angin Dasar	30
Tabel 3.8 Komponen Beban Angin yang Bekerja pada Kendaraan	30
Tabel 5.1 Spesifikasi <i>Strands</i> Baja Prategang	43
Tabel 5.2 Material dan Berat Jenis Material	43
Tabel 5.3 Properties Penampang <i>Box Girder</i> Trapesium	45
Tabel 5.4 Properties Penampang <i>Box Girder</i> Persegi	46
Tabel 5.5 Properties Penampang	48
Tabel 5.6 Dimensi Trotoar dan Pagar	49
Tabel 5.7 Luasan Beban Mati Tambahan Air Hujan dan Aspal	50
Tabel 5.8 Rekapitulasi Beban, Momen dan Gaya Geser <i>Box</i> Trapesium	55
Tabel 5.9 Rekapitulasi Beban, Momen dan Gaya Geser <i>Box</i> Persegi	56
Tabel 5.10 Rekapitulasi Gaya Prategang Awal dan Efektif	59
Tabel 5.11 Rekapitulasi Perhitungan Momen	61
Tabel 5.12 Rekapitulasi Batas Bawah Tendon	62
Tabel 5.13 Rekapitulasi Batas Atas Tendon	63
Tabel 5.14 Spesifikasi Baja Prategang Penampang Trapesium	64



Tabel 5.16 Spesifikasi Baja Prategang Penampang Persegi	67
Tabel 5.17 Jumlah <i>Strands</i> Setiap Baris	68
Tabel 5.18 Perhitungan Lintasan Tendon Penampang Trapesium	72
Tabel 5.19 Perhitungan Lintasan Tendon Penampang Persegi	75
Tabel 5.20 Perhitungan <i>Layout</i> Tendon Penampang Trapesium	76
Tabel 5.21 Perhitungan <i>Layout</i> Tendon Penampang Persegi	79
Tabel 5.22 Koefisien <i>Wobble</i>	84
Tabel 5.23 Rekapitulasi Kehilangan Akibat Gaya Prategang Penampang Trapesium	88
Tabel 5.24 Rekapitulasi Kehilangan Akibat Gaya Prategang Penampang Perseg	89
Tabel 5.25 Momen Ultimit Akibat Beban Penampang Trapesium	102
Tabel 5.26 Momen Ultimit Akibat Beban Penampang Persegi	105
Tabel 5.27 Lendutan Akibat Beban Penampang Trapesium	106
Tabel 5.28 Lendutan Akibat Beban Penampang Trapesium	108
Tabel 5.29 Rekapitulasi Pembebanan Penampang Trapesium	111
Tabel 5.30 Kombinasi Pembebanan Trapesium	111
Tabel 5.31 Hasil Kombinasi Pembebanan Trapesium	111
Tabel 5.34 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang	122
Tabel 5.35 Rekapitulasi <i>Chamber</i> dan Lendutan <i>Box Girder</i>	123

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.2 Pembebanan Truk “T”	29
Gambar 4.1 Lokasi Jembatan Grembyangan	32
Gambar 4.2 Data Topografi Jembatan Grembyangan	32
Gambar 4.2 Penampang Memanjang Jembatan	33
Gambar 5.1 Penampang Melintang Box Girder Trapesium Prategang	41
Gambar 5.2 Penampang Melintang Box Girder Persegi Prategang	42
Gambar 5.3 Tinggi Penampang <i>Box Girder</i>	44
Gambar 5.4 Properties Box Girder Penampang Trapesium	44
Gambar 5.5 Properties <i>Box Girder</i> Penampang Persegi	45
Gambar 5.6 Gaya Prategang Awal dan Eksentrisitas Tendon di Tengah	58
Gambar 5.7 Susunan Layout Tendon di Tengah Bentang	65
Gambar 5.8 Susunan Layout Tendon di Tengah Bentang	68
Gambar 5.9 <i>Layout</i> Tendon di Tengah Bentang Penampang Trapesium	70
Gambar 5.10 <i>Layout</i> Tendon di Ujung Bentang Penampang Trapesium	70
Gambar 5.11 Lintasan Tendon Penampang Trapesium	71
Gambar 5.12 <i>Layout</i> Tendon di Tengah Bentang Penampang Persegi	73
Gambar 5.13 <i>Layout</i> Tendon di Ujung Bentang Penampang Persegi	73
Gambar 5.14 Lintasan Tendon	74
Gambar 5.15 Lintasan Kabel Tendon Penampang Trapesium	79
Gambar 5.16 Lintasan Kabel Tendon Penampang Persegi	83
Gambar 5.17 Tegangan Saat Transfer Penampang Trapesium	90
Gambar 5.18 Nilai Tegangan Saat Kondisi Transfer Penampang Trapesium	92

Gambar 5.19 Tegangan Saat Layan	92
Gambar 5.20 Nilai Tegangan Saat Kondisi Layan Penampang Trapesium	95
Gambar 5.21 Tegangan Saat Transfer Penampang Persegi	95
Gambar 5.22 Nilai Tegangan Kondisi Transfer Penampang Persegi	97
Gambar 5.23 Tegangan Saat Layan Penampang Persegi	98
Gambar 5.24 Nilai Tegangan Kondisi Layan Penampang Persegi	100
Gambar 5.25 VSL <i>Anchorage Type E 0.5</i>	109
Gambar 5.26 Penulangan <i>Anchorage Type E 0.5</i>	109
Gambar 5.27 Grafik Gaya Geser Penampang Trapesium	112
Gambar 5.28 Tulangan Penampang Trapesium	114
Gambar 5.29 Grafik Gaya Geser Penampang Trapesium	116
Gambar 5.30 Tulangan Penampang Persegi	118
Gambar 5.31 Grafik Kehilangan Prategang ( <i>Loss Of Prestress</i> )	120

## ABSTRAK

Jembatan Grembyangan merupakan salah satu infrastruktur yang dibangun di wilayah Kabupaten Sleman. Jembatan Grembyangan menghubungkan dua kepanewon di Kabupaten Sleman, yaitu Kepanewon Berbah dan Kepanewon Prambanan. Jembatan Grembyangan memiliki panjang bentang 80 meter dan lebar jalan 9 meter yang dibangun melintang diatas Kali Opak dengan menggunakan gelagar I prategang. Dengan bentang 80 meter, gelagar dapat didesain dengan menggunakan *box girder* dalam bentuk trapesium atau persegi. Kedua *box girder* akan dibandingkan untuk memperoleh hasil yang lebih baik dari gelagar I prategang.

Perhitungan pembebanan mengacu pada SNI 1725:2016. Peraturan beton untuk jembatan menggunakan RSNi – T – 12 – 2004. Peraturan untuk desain baja prategang menggunakan peraturan ASTM A416M – 16. Peraturan gempa untuk jembatan mengacu pada Perencanaan Jembatan pada Beban Gempa SNI 2833:2016. Perbandingan dilakukan pada perbedaan luas tampang, jumlah tendon, jumlah *strands*, kehilangan prategang dan lendutan yang terjadi pada gelagar *box* prategang. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan Microsoft Excel 2013.

Penampang trapesium memiliki luas penampang  $9,777 \text{ m}^2$ , jumlah tendon 30 buah, jumlah *strands* 32 buah/tendon, total *strands* 960 buah. Sedangkan pada gelagar penampang persegi memiliki luas penampang  $11,040 \text{ m}^2$ , jumlah tendon 30 buah, jumlah *strands* 40 buah/tendon, total *strands* 1200 buah. Berdasarkan analisis yang dilakukan pada penampang *box girder* trapesium dan persegi terdapat perbedaan eksentrisitas tendon prategang pada kedua penampang dengan tinjauan kondisi jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* ( $z_0$ ) sebesar 0,502 meter. Penampang trapesium memiliki nilai eksentrisitas ( $e_s$ ) sebesar 1,401 meter dan penampang persegi memiliki nilai eksentrisitas ( $e_s$ ) sebesar 1,338 meter. Terdapat perubahan nilai eksentrisitas penampang *box girder* persegi akibat penentuan jarak tata letak tendon, sehingga nilai eksentrisitasnya menjadi 0,99 meter dan melebihi batas aman daerah tendon. Nilai kehilangan prategang penampang trapesium sebesar 26,94 % dan pada penampang persegi sebesar 27,70 %. Nilai lendutan yang diperoleh penampang trapesium sebesar 0,135 meter dan pada penampang persegi sebesar 0,205 meter. Lendutan seketika pada kedua penampang tersebut masih memenuhi syarat lendutan ijin  $L/250$  atau sebesar 0,32 meter. Penampang trapesium lebih aman digunakan daripada penampang persegi.

**Kata kunci:** *Box Girder* Trapesium, *Box Girder* Persegi, Eksentrisitas, Kehilangan Prategang, Lendutan

## ABSTRACT

*Grembyangan bridge is one of the infrastructure built in Sleman Regency. Grembyangan bridge connects two kepalawon in Sleman Regency, namely Kepalawon Berbah and Kepalawon Prambanan. Grembyangan bridge has a span length of 80 meters and a road width of 9 meters which is built crosswise over the Opak River using prestressed girders. With a span of 80 meters, the girder can be designed using a box girder in the form of a trapezoid or square. Both box girders will be compared to obtain better results from prestressed girders. The calculation is performed using the help of Microsoft Excel 2013.*

*The calculation of loading refers to SNI 1725: 2016. Concrete code for bridges using RSNI – T – 12-2004. Code for the design of prestressed steel using ASTM a416m – 16 code. Earthquake code for bridges refer to the planning of bridges at earthquake loads SNI 2833: 2016. The comparison was conducted on the difference in visual area, the number of tendons, the number of strands, prestressed loss and deflection that occurred in the prestressed box girder.*

*Trapezoidal cross section has a cross-sectional area of 9.777 m<sup>2</sup>, the number of tendons 30 pieces, the number of strands 32 pieces / tendon, total strands 960 pieces. While the square cross-sectional girder has a cross-sectional area of 11.040 m<sup>2</sup>, the number of tendons 30 pieces, the number of strands 40 pieces / tendon, total strands 1200 pieces. Based on the analysis carried out on the trapezoidal and square box girder cross sections there are differences in the eccentricity of the prestressed tendon in both cross sections with a review of the condition of the tendon weight Center distance to the bottom side of the box girder ( $z_0$ ) of 0.502 meters. Trapezoidal cross section has an eccentricity value ( $e_s$ ) of 1.401 meters and a square cross section has an eccentricity value ( $e_s$ ) of 1.338 meters. There is a change in the eccentricity value of the square box girder cross section due to the determination of the tendon layout distance, so that the eccentricity value becomes 0.99 meters and exceeds the safe limit of the tendon area. The value of prestressed loss in trapezoidal cross section is 26.94 % and in square cross section is 27.70 %. The deflection value obtained by the trapezoid facer is 0.135 meters and the square cross section is 0.205 meters. The instantaneous deflection on both cross sections still meets the L/250 permit deflection requirements or 0.32 meters. Trapezoidal cross sections are safer to use than square cross sections*

*Keywords: Trapezoidal Box Girder, Square Box Girder, Eccentricity, Prestressing Loss, Deflection*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Infrastruktur memegang peranan penting sebagai roda penggerak kegiatan pertumbuhan ekonomi dan pembangunan. Keberadaan infrastruktur yang memadai sangat diperlukan, salah satunya adalah jembatan. Jembatan adalah suatu konstruksi yang berfungsi meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang permukaannya lebih rendah. Rintangan dapat berupa jalan lain, rel kereta api, irigasi, sungai, laut, dan lainnya. Jembatan merupakan investasi tertinggi dari semua elemen yang dapat dijumpai pada sistem jalan raya. (Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Cipta Karya, 2020).

Jembatan Grembyangan merupakan salah satu infrastruktur yang dibangun di wilayah Kabupaten Sleman. Jembatan Grembyangan menghubungkan dua kepanewon di Kabupaten Sleman, yaitu Kepanewon Berbah dan Kepanewon Prambanan. Selain sebagai penghubung antar dua kepanewon, jembatan tersebut juga digunakan untuk memudahkan akses menuju tempat pemakaman umum (TPU).

Jembatan Grembyangan dibangun diatas Kali Opak, memiliki panjang bentang 80 meter dan lebar jalan 9 meter yang dibangun dengan menggunakan gelagar I prategang. Penelitian ini akan mendesain jembatan tersebut menggunakan gelagar *box girder* prategang. *Box girder* dapat berbentuk trapesium atau persegi girder. Kedua penampang dapat digunakan pada bentang panjang dan menerus. Namun, penelitian tentang perbandingan kedua *box girder* belum banyak dilakukan.

Penelitian ini akan dibahas mengenai dimensi penampang, mutu beton yang digunakan, jumlah tendon yang digunakan serta kapasitas momen yang terjadi pada kedua penampang tersebut. Hasil yang akan diperoleh dari penelitian ini akan diambil desain yang optimal untuk Jembatan Grambyangan dengan panjang bentang 80 meter.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berapa dimensi komponen struktur atas *box girder* beton prategang yang akan digunakan ?
2. Bagaimana pengaruh penampang *box girder* trapesium dan persegi prategang bentang 80 meter terhadap tata letak dan jumlah tendon yang digunakan ?
3. Bagaimana pengaruh penampang *box girder* trapesium dan persegi prategang bentang 80 meter terhadap besar kehilangan prategang yang terjadi pada gelagar?
4. Berapa lendutan yang terjadi pada gelagar *box girder* trapesium dan persegi prategang bentang 80 meter ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang akan dilakukan yaitu,

1. Mengetahui dimensi penampang *box girder* trapesium dan persegi prategang bentang 80 meter.
2. Mengetahui perbandingan kebutuhan tendon dan tata letak tendon pada *box girder* trapesium dan persegi prategang bentang 80 meter.
3. Mengetahui perbandingan kehilangan prategang yang terjadi pada *box girder* trapesium dan persegi prategang bentang 80 meter.
4. Mengetahui perbandingan lendutan pada *box girder* trapesium dan persegi prategang bentang 80 meter.

## 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah untuk mengetahui hasil perbandingan struktur atas gelagar penampang *box girder* trapesium prategang dengan penampang *box girder* persegi prategang Jembatan Grembyangan bentang 80 meter. Selain itu, penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan penelitian – penelitian selanjutnya dengan bentang yang berbeda sesuai dengan persyaratan pembebanan SNI 1725:2016.



## 1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Jembatan yang digunakan sebagai studi yaitu Jembatan Grembyangan yang terletak di Kepanewon Prambanan.
2. Gelagar utama jembatan menggunakan *box girder* beton prategang.
3. Peraturan untuk beton pada jembatan menggunakan RSNI T-12-2004.
4. Peraturan pembebanan pada jembatan menggunakan SNI 1725:2016.
5. Peraturan baja prategang menggunakan ASTM A416M – 16.
6. Peraturan gempa untuk jembatan menggunakan SNI 2833-2016.
7. Peraturan beton prategang menggunakan ACI 318-14.
8. Peraturan kehilangan prategang akibat rangkai dan susut menggunakan ACI 209.2R – 08.
9. Katalog untuk prategang menggunakan *VSL Strand Post-Tensioning System*.
10. Struktur yang dihitung merupakan struktur atas gelagar jembatan.
11. Mutu material dan dimensi diasumsikan berdasarkan *trial and error*.
12. Bentang Jembatan Grembyangan sepanjang 80 meter dengan lebar total jembatan 9 meter. Lebar total lajur jembatan 6 meter dan lebar total trotoar 3 meter.
13. Tidak memperhitungkan volume gelagar dan RAB

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Kajian Penelitian Terdahulu**

Pada sub bab ini, peneliti menyajikan beberapa penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya sebagai bahan untuk referensi penelitian dan standar yang berlaku untuk perbandingan gelagar jembatan menggunakan tipe *box girder* trapesium dan persegi prategang.

##### **2.1.1 Studi Perbandingan Penggunaan Gelagar Beton Prategang Tipe I Dan U Pada Jembatan Bentang Menengah**

Darwis (2016) melakukan studi perbandingan dalam penggunaan gelagar jembatan dengan menggunakan beton prategang tipe I dan U. Beton prategang dipilih karena mempunyai mutu kualitas yang lebih terjamin dan proses pelaksanaannya yang mudah pada bentang yang relatif lebih panjang. Peraturan pembebanan pada perencanaan ini didasarkan pada peraturan RSNI T-02-2005 yang memenuhi persyaratan jembatan tahan gempa. Kemudian analisis struktur didasarkan pada RSNI T-12-2004 Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan. Analisis struktur atas jembatan menggunakan software Ms. Excel 2010 dan SAP 2000 v11, kemudian hasil dari perencanaan digambar menggunakan software AutoCAD 2007. Struktur atas jembatan didisain aman terhadap beban yang bekerja pada konstruksi jembatan tersebut dengan lebar badan jalan 7 m, lebar trotoar 1 m, dan panjang 40 m. Hasil perencanaan jembatan meliputi gelagar yang berbentuk I-Girder dan U-Girder, masing – masing dengan tebal slab 0,2 m dan tinggi penampang I-Girder 2,1 m sedangkan U-Girder 1,85 m, dimana kehilangan gaya prategang I-Girder adalah 32,825%, lebih kecil daripada U-Girder yang mencapai 34,5%. Baja prategang menggunakan strands 7 kawat yang sesuai dengan spesifikasi ASTM A-416 dan digunakan angkur VSL tipe E-55 masing-masing 4 tendon untuk I-Girder dan 8 tendon untuk U-Girder. Berat Struktur atas akan berpengaruh besar terhadap desain struktur bawah, dengan berat masing-masing

4062,33 kN untuk I-Girder dan 4171,06 kN untuk U-Girder. Pemilihan Jenis Struktur atas yang paling efektif berdasarkan analisis adalah tipe I.

### **2.1.2 Studi Perbandingan Desain Struktur Atas Jembatan Siak I Menggunakan *Prestressed Concrete Box Girder Prismatic* dan *Non-Prismatic*.**

Harahap (2017), melakukan perbandingan desain struktur atas jembatan siak I menggunakan *box girder prismatic* dan *nonprismatic*. Jembatan Siak I dibangun di atas Sungai Siak yang menghubungkan daerah Senapelan dan daerah Rumbai di Kota Pekanbaru Provinsi Riau. Jembatan Siak I dibangun dpada tahun 1973 menggunakan gelagar komposit dan tidak menggunakan standar yang dipersiapkan untuk beban kendaraan berat, dimana beban rencananya masih di bawah standar Bina Marga yang dipergunakan Indonesia. Kemudian dibuat Studi Perbandingan Desain Struktur Atas Jembatan Siak I menggunakan *Prestressed Concrete Box Girder Prismatic* dan *Prestressed Concrete Box Girder Non Prismatic*. Digunakan bentang desain 50 m. dan spesifikasi material yang sama. Peraturan-peraturan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Standar Pembebanan jembatan (RSNIT-02-2005), Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan (RSNIT-12-2004) dan Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan (SNI 2833-2008). Analisis struktur jembatan menggunakan Microsoft Excel 2013. Hasil dari desain *prestressed concrete box girder prismatic* meliputi luas penampang sebesar 7,363 m<sup>2</sup>, jumlah strands 28 buah, kehilangan gaya prategang 27,478 % dan lendutan sebesar 0,062 m. Sedangkan hasil dari desain *prestressed concrete box girder non prismatic* meliputi luas penampang sebesar 7,379 m<sup>2</sup>, jumlah strands 27 buah, kehilangan gaya prategang 26,765% dan lendutan sebesar 0,053 m. Dari hasil diatas dapat disimpulkan bahwa *prestressed concrete box girder non prismatic* lebih efektif digunakan untuk bentang 50 m pada desain struktur atas Siak I.

### **2.1.3 Studi Perbandingan Penggunaan PCU Girder Dan PCI Girder pada Struktur Atas Jembatan Jurang Gempal, Wonogiri**

Putra dkk., (2017) melakukan penelitian tentang studi perbandingan penggunaan PCU Girder dan PCI Girder pada struktur atas jembatan Jurang Gempal, Wonogiri. Penelitian ini dilakukan kajian perbandingan penggunaan

material beton PCU Girder dan PCI Girder untuk menggantikan struktur atas yang bermaterial baja. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui perbandingan hasil desain terkait kebutuhan total girder, kebutuhan tendon dan penulangan pada struktur atas Jembatan Gempal. Peraturan tentang pembebanan jembatan di Indonesia mengacu pada Peraturan Standar Pembebanan Untuk Jembatan RSNI T-02- 2005, Standar Perencanaan Gempa Untuk Jembatan SNI 2833-2008, dan Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan RSNI T-12- 2004. Dari hasil penelitian didapatkan struktur atas jembatan dengan menggunakan PCU Girder didesain menggunakan 4 girder sebesar 5,1192 m<sup>2</sup> sedangkan struktur PCI Girder menggunakan 5 girder dan mempunyai luas total 3,7615 m<sup>2</sup> . Jumlah tendon PCU Girder 32 buah sedangkan PCI Girder memiliki 20 buah tendon. Dengan jenis yang sama yaitu ASTM A416 grade 270. Jumlah tulangan pokok dan geser PCU Girder lebih banyak dibandingkan dengan PCI Girder, sehingga lebih mahal.

#### **2.1.4 Analisis Struktur Jembatan Cisomang dengan Menggunakan *Single Box Girder* dan *Multibox Girder*.**

Firmansyah (2019), melakukan analisis perbandingan gelagar box girder di Jembatan Cisomang. Jembatan Cisomang merupakan jembatan yang dibangun pada tahun 2002 di atas Sungai Cisomang yang menghubungkan kota Bandung dan kota Jakarta yang berada pada ruas tol Purwakarta – Bandung – Cileunyi (Purbaleunyi). Jembatan Cisomang didesain menggunakan Gelagar Pratekan Indonesia (GPI) dengan total panjang jembatan 250 m dan lebar 12 m. Analisis dilakukan terhadap gelagar jembatan dengan menggunakan *Pre-stressed Concrete Single Box Girder* dan *Pre-stressed Concrete Multibox Girder* dengan bentang 50 m dan spesifikasi material yang sama. Peraturan-peraturan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Peraturan Standar Pembebanan untuk Jembatan (SNI-1725-2016), Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan (RSNIT-12-2004), dan Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan (SNI-2833-2008). Analisis struktur jembatan menggunakan program Microsoft Excel 2013. Hasil dari desain *Pre-stressed Concrete Single Box Girder* meliputi luas penampang 10,237 m<sup>2</sup>, jumlah tendon 16 buah, jumlah strand 880 buah, kehilangan gaya prategang 29,005%, dan lendutan 0,02389 m, sedangkan hasil dari desain *Pre-stressed Concrete Multibox Girder*

meliputi luas penampang  $10,24 \text{ m}^2$ , jumlah tendon 16 buah, jumlah strand 880 buah, kehilangan gaya prategang 27,689%, dan lendutan 0,00019 m. Dari hasil di atas dapat disimpulkan bahwa *Pre-stressed Concrete Multibox Girder* lebih efektif digunakan untuk bentang 50 m pada desain struktur atas Jembatan Cisomang.

#### **2.1.5 Perbandingan Desain Struktur Balok Sederhana Bentang 50 Meter Menggunakan *Prestressed Concrete T Girder* dan *Prestressed Concrete Box Girder*.**

Rahmawati (2019), melakukan desain ulang dan perbandingan gelagar beton T girder dan box girder di Jembatan Sirnobojo. Jembatan Sirnobojo pada awalnya di bangun pada tahun 2015 dengan menggunakan *prestressed concrete I girder* dan standar pembebanan (RSNIT-02-2005). Kemudian, dilakukan desain ulang penampang jembatan menggunakan 2 jenis balok prategang, yaitu *prestressed concrete T girder* dan *prestressed concrete box girder* penampang trapesium. Perencanaan struktur atas jembatan Sirnobojo Pacitan dilakukan dengan cara analisis bentang balok sederhana bentang 50 meter, dengan bantuan program SAP 2000 V.11 untuk perhitungan slab lantai jembatan. Peraturan yang digunakan dalam analisis ini yaitu Peraturan Standar Pembebanan jembatan (SNI 1725:2016), Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan (RSNIT-12-2004) dan Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan (SNI 2833-2008). Hasil akhir perencanaan digambar menggunakan program AutoCAD. Perbandingan kedua balok prategang ini menggunakan parameter berupa luas penampang dan jumlah tendon dengan jumlah *strands* tiap tendon yang sama. Hasil dari desain *prestressed concrete T girder* meliputi luas penampang sebesar  $9,452 \text{ m}^2$ , jumlah tendon rencana yaitu 20 buah, jumlah *strands* pakai yaitu 800 buah, kehilangan gaya prategang 28,83 % dan lendutan sebesar 0,05347 m. Sedangkan hasil dari desain *prestressed concrete box girder* meliputi luas penampang sebesar  $12,289 \text{ m}^2$ , jumlah tendon rencana yaitu 24 buah, jumlah *strands* pakai 960 buah, kehilangan gaya prategang 26,8% dan lendutan sebesar 0,0165 m. Dari parameter perbandingan yang sudah disebutkan di atas dapat disimpulkan bahwa *prestressed concrete T girder* relatif lebih efektif digunakan untuk bentang 50 m pada desain struktur atas Jembatan Sirnobojo.

Tabel 2.1 Studi Literatur Penelitian Terdahulu

Aspek	Penelitian Terdahulu					Penelitian Yang Akan Dilakukan
Peneliti	Darwis	Harahap	Putra dkk.	Firmansyah	Rahmawati	Hanifah
Tahun	2016	2017	2017	2019	2019	2022
Judul Penelitian	Studi Perbandingan Penggunaan Gelagar Beton Prategang Tipe I Dan U Pada Jembatan Bentang Menengah	Studi Perbandingan Desain Struktur Atas Jembatan Siak I Menggunakan <i>Prestressed Concrete Box Girder Prismatic</i> dan <i>Non-Prismatic</i>	Studi Perbandingan Penggunaan Penggunaan PCU Girder Dan PCI Girder pada Struktur Atas Jembatan Jurang Gempal, Wonogiri	Analisis Struktur Jembatan Cisomang dengan Menggunakan <i>Single Box Girder</i> dan <i>Multibox Girder</i> .	Perbandingan Desain Struktur Balok Sederhana Bentang 50 Meter Menggunakan <i>Prestressed Concrete T Girder</i> dan <i>Prestressed Concrete Box Girder</i> .	Perbandingan Tipe <i>Box Girder Prestressed</i> Trapesium Dan Persegi Pada Gelagar Jembatan Grembyangan Bentang 80 Meter Penghubung Kepanewon Berbah Dan Prambanan
Lokasi	-	Jembatan Siak, Kota Pekanbaru, Provinsi Riau	Jembatan Jurang Gempal, Wonogiri	Jembatan Cisomang, Bandung - Jakarta	Jembatan Sirnboyo	Jembatan Grembyangan, Sleman

Aspek	Penelitian Terdahulu					Penelitian Yang Akan Dilakukan
	Peneliti	Darwis	Harahap	Peneliti	Darwis	
Tahun	2016	2017	Tahun	2016	2017	Tahun
Tipe Jembatan	Jembatan gelagar Prategang Tipe I Dan U	Jembatan gelagar <i>Prestressed Concrete Box Girder Prismatic</i> dan <i>Non-Prismatic</i>	Jembatan gelagar prategang PCU Girder Dan PCI Girder	Jembatan gelagar prategang Single Box Girder dan Multibox Girder	Jembatan <i>Prestressed Concrete T Girder</i> dan <i>Prestressed Concrete Box Girder.</i>	Jembatan gelagar <i>Box Girder Prestressed</i> Trapesium Dan Persegi
Panjang Bentang	-	50 meter	50 meter	50 meter	50 meter	80 meter
Peraturan yang digunakan	Peraturan pembebanan (RSNI T-02-2005) yang memenuhi persyaratan	Standar Pembebanan jembatan (RSNIT-02-2005), Perencanaan	Standar Pembebanan Untuk Jembatan RSNI T-02- 2005,	Peraturan Standar Pembebanan untuk Jembatan (SNI-1725-	Peraturan Standar Pembebanan jembatan (SNI 1725:2016),	Pembebanan untuk Jembatan (SNI 1725:2016), Peraturan beton untuk jembatan



	<p>jembatan tahan gempa. Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan didasarkan pada RSNI T-12-2004</p>	<p>Struktur Beton Untuk Jembatan (RSNIT-12-2004) dan Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan (SNI 2833-2008)</p>	<p>Standar Perencanaan Gempa Untuk Jembatan SNI 2833-2008, dan Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan RSNI T-12- 2004.</p>	<p>2016), Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan (RSNIT-12-2004), dan Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan (SNI-2833-2008).</p>	<p>Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan (RSNIT-12-2004) dan Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan (SNI 2833-2008)</p>	<p>(RSNI – T – 12 – 2004), Peraturan untuk desain baja prategang (ASTM A416M – 16), Perencanaan Jembatan pada Beban Gempa (SNI 2833:2016)</p>
--	---	---	---	--	---	---

## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Konstruksi Jembatan**

Konstruksi jembatan terbagi menjadi beberapa bagian struktur jembatan, yaitu:

1. Bangunan atas (*Superstructure*).
2. Bangunan bawah (*Substructure*).
3. Landasan dan pondasi jembatan.
4. Oprit.
5. Bangunan Pelengkap Jembatan.

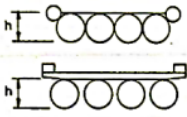
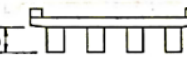
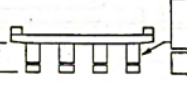
##### **3.1.1 Konstruksi Bangunan Atas (Superstructure)**

Bangunan atas jembatan (*Superstructure*) adalah bagian dari struktur jembatan yang berfungsi memikul langsung beban lalu lintas serta melimpahkannya ke bangunan bawah melalui struktur perletakan. Bagian-bagian bangunan atas terdiri dari:

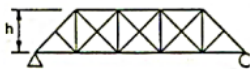
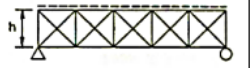
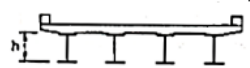
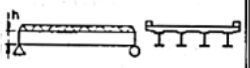
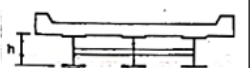


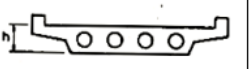
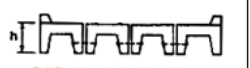
1. Gelagar utama.
  - a. Rangka kayu, merupakan tipe jembatan dengan menggunakan kayu sebagai rangka utama. Rangka kayu digunakan pada variasi bentang 20 – 50 meter.
  - b. Rangka baja, merupakan tipe jembatan dengan menggunakan baja sebagai rangka utama. Rangka baja digunakan pada variasi bentang tergantung pada bentuk bentang utama.
  - c. Gelagar kayu, merupakan tipe jembatan dengan menggunakan kayu sebagai gelagar utama. Gelagar kayu bisa menggunakan kayu gergaji atau komposit.
  - d. Gelagar baja, merupakan tipe jembatan dengan menggunakan baja sebagai gelagar utama. Gelagar baja biasanya dikombinasikan dengan lantai pelat baja atau pelat beton (komposit).

- e. Gelagar beton bertulang, merupakan tipe jembatan dengan menggunakan beton sebagai gelagar utama tanpa menggunakan tendon prategang.
  - f. Gelagar beton prategang, merupakan tipe jembatan dengan menggunakan beton sebagai gelagar utama dengan menggunakan tendon prategang. Tipe gelagar beton prategang berupa I girder, box girder, U girder. Tipe box girder akan digunakan pada perancangan Jembatan Grembyangan dengan bentang 80 meter.
  - g. Gelagar komposit, merupakan jembatan dengan tipe gelagar yang menggunakan 2 material, seperti gelagar baja dan beton, gelagar kayu dan baja, atau gelagar beton dan kayu.
2. Gelagar memanjang
- Gelagar memanjang pada struktur jembatan meliputi :
- a. Ikatan angin, berfungsi untuk memberi kekakuan pada jembatan dan meneruskan beban akibat angin kepada portal akhir.
  - b. Sandaran, berfungsi sebagai pembatas antara daerah kendaraan dengan tepi jembatan dan sebagai pengaman bagi pemakai lalu lintas.
  - c. Lantai jembatan, berfungsi sebagai lantai untuk lalu lintas, merupakan balok yang disusun sedemikian sehingga mampu mendukung beban
  - d. *Expansion joint*, merupakan bahan yang dipasang pada sambungan konstruksi agar tidak mengalami perubahan dan tetap aman saat dilalui.



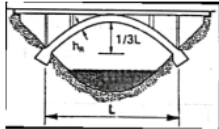
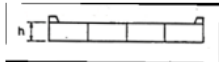
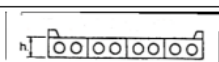
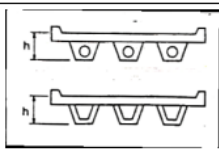


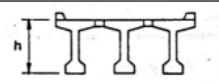
**Tabel 3.1 Tipe – Tipe Jembatan**

Jenis Bangunan Atas	Bentuk Bentang Utama	Variasi Bentang	Perbandingan h/L Tipikal Tinggi/Bentang	Penampilan	Catatan
<b>Bangunan atas kayu:</b> a) Jembatan balok dengan lantai urug atau lantai papan		5 - 20 m	1/15	kurang	Unsur kayu dapat dibuat dengan ekonomis di lapangan dari bahan hasil hutan. Bagaimanapun karena kesulitan perawatan kayu terhadap lapuk, jembatan kayu mempunyai batas umur dan hanya dianjurkan sebagai jembatan sementara
b) Gelagar kayu gergaji dengan lantai papan		5 - 10 m	1/5	kurang	
c) Gelagar komposit kayu/baja gergaji dengan lantai papan		8 - 12 m	1/5	kurang	

Lanjutan Tabel 3.1 Tipe – Tipe Jembatan

Jenis Bangunan Atas	Bentuk Bentang Utama	Variasi Bentang	Perbandingan h/L Tipikal Tinggi/ Bentang	Penampilan	Catatan
d) Rangka lantai atas dengan papan kayu		20 - 50 m	1/6	kurang	
e) Rangka lantai atas dengan papan kayu		20 - 50 m	1/5	kurang	
f) Gelagar baja dengan lantai papan kayu		5 - 35 m	1/17 – 1/30	kurang	
<b>Bangunan atas baja:</b>					Keuntungan penggunaan rangka dan gelagar baja prafabriksi di Indonesia adalah sebagai berikut: a) Komponen standar dapat disimpan siap pakai untuk diangkut ke jembatan b) Rencana/gambar dan bahan tersedia untuk segera
a) Gelagar baja dengan lantai pelat baja		5 - 25 m	1/25 – 1/27	kurang	
b) Gelagar baja dengan lantai beton komposit			1/20	fungsional	
• Bentang sederhana • Bentang menerus		15 – 50 m 35 – 90 m			dimulai setelah panjang dan konfigurasi jembatan ditentukan. Perencanaan lebih sederhana dan hanya memerlukan pendetailan bangunan bawah c) Produksi massal dapat mengurangi biaya dan menjamin kualitas komponen d) Tahapan standar mengurangi masalah pemasangan/peluncuran dan keperluan supervisi e) Mudah diangkut lewat laut atau jalan ke lokasi jembatan f) Penyimpanan, penanganan dll dari komponen adalah mudah dengan peralatan minimum g) Hubungan/sambungan lapangan adalah sederhana
c) Gelagar boks baja dengan lantai beton komposit		30 – 60 m 40 – 90 m	1/20	baik	
• Bentang sederhana • Bentang menerus					
<b>Jembatan beton bertulang:</b>					Bangunan atas beton bertulang mempunyai sifat berikut: • Harus umumnya dilaksanakan di tempat terpisah dari jembatan pelat pendek • Pelaksanaan di tempat memerlukan perancah, dengan demikian sungai tidak boleh terlalu dalam atau mempunyai batu-batu besar padamana perancah sulit dibangun
a) Pelat beton bertulang		5 – 10 m	1/12.5	fungsional	
b) Pelat berongga		10 – 18 m	1/18	fungsional	
c) Kanal pracetak		5 – 13 m	1/15	kurang	

Lanjutan Tabel 3.1 Tipe – Tipe Jembatan

Jenis Bangunan Atas	Bentuk Bentang Utama	Variasi Bentang	Perbandingan h/L Tipikal Tinggi/Bentang	Penampilan	Catatan	
d) Gelagar beton 'T'		6 – 25 m	1/12 – 1/15	fungsional	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umur bebas pemeliharaan sangat tergantung pada pengendalian mutu selama pelaksanaan mengingat toleransi pada perancah, penempatan tulangan, perbandingan campuran beton agregat, kualitas semen, kadar air, perawatan, dll.</li> </ul>	
e) Gelagar beton boks		12 – 30 m	1/12 – 1/15	fungsional		
f) Lengkung beton (bentuk parabola)		30 – 70 m	1/30 rata-rata	estetik		
<b>Jembatan beton pratekan:</b>					Bangunan atas beton pratekan mempunyai keuntungan utama berikut:	
a) Segmen pelat		6 – 12 m	1/20	fungsional	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pengendalian mutu yang baik dari pembuatan geagar di mana gelagar dibuat di pabrik</li> <li>Pemeliharaan kecil</li> <li>Umur diharapkan panjang (lebih dari 50 tahun)</li> <li>Tahap perencanaan dan pelaksanaan standar</li> <li>Penggunaan efisien dari beton dan bahan yang terdapat di Indonesia</li> </ul> <p>Bagaimanaun penggunaan beton pratekan umumnya dibatasi pada lokasi di mana unsur beton pratekan dibuat di pabrik balok pratekan khusus. Beton pratekan mempunyai pembatasan berikut:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Balok adalah berat dan memerlukan pengangkutan khusus</li> <li>Keran diperlukan untuk menempatkan gelagar (pasca penegangan atau pra penegangan)</li> <li>Penegangan harus dilakukan oleh pegawai berpengalaman dengan peralatan khusus</li> <li>Balok hanya dapat diangkut ke lapangan dalam jarak cukup dekat dari pabrik pada jalan baik. Balok dapat diangkut oleh kapal bila perlu</li> <li>Kabel baja pratekan dan alat penegangan harus diimpor</li> </ul>	
b) Segmen pelat berongga		6 – 16 m	1/20	fungsional		
c) Segmen berongga komposit dengan lantai beton		8 – 14 m 16 – 20 m	1/18	fungsional		
d) Gelagar I dengan lantai komposit dalam bentang sederhana:						
• Pra penegangan		12 – 35 m	1/15 – 1/16.5	Fungsional		
• Pasca penegangan		18 – 35 m				
• Pra-pasca penegangan		18 – 25 m				
e) Gelagar I dengan lantai beton komposit dalam bentang menerus		20 – 40 m				1/17.5
f) Gelagar I pra-penegangan dengan lantai komposit dengan bentang tunggal		16 – 25 m			1/15 – 1/16.5	Fungsional
g) Gelagar 'T' pasca penegangan		20 – 45 m	1/16.5 – 1/17.5	Fungsional		

### 3.2 Konstruksi Bangunan Bawah (*Substructure*)

Bangunan bawah (*Substructure*) adalah bagian dari struktur jembatan yang berfungsi memikul bangunan atas serta melimpahkannya ke pondasi. Jenis bangunan bawah terdiri dari :

#### 1. Pilar (*pier*)

Pilar di gunakan untuk memberikan tekanan terhadap beban-beban yang bekerja pada pada bangunan atas, tidak terbatas hanya beban vertikal saja tetapi:

- a. Gaya gesekan
- b. Gaya aliran dan benda hanyutan
- c. Gaya rem
- d. Gempa

#### 2. Abutmen (kepala jembatan)

Kepala jembatan (abutment), adalah bangunan bawah jembatan yang terletak pada kedua ujung pilar–pilar jembatan, berfungsi sebagai pemikul seluruh beban hidup (angin, kendaraan, dll.) dan mati (beban gelagar, dll.), serta berfungsi sebagai tembok penahan tanah yaitu menahan tekanan tanah aktif.

#### 3.2.1 Landasan dan Pondasi Jembatan

Landasan adalah suatu bagian ujung dari suatu bangunan atas jembatan yang berfungsi menyalurkan gaya-gaya reaksi dari bangunan atas ke bangunan bawah sekaligus menjadi tumpuan bangunan atas di atas bangunan bawah. Jenis landasan terdiri dari :

1. Landasan tetap
2. Landasan gerak (*roll sliding*)

Landasan dibuat dari bahan yang cukup keras yaitu mempunyai hardness 55+5 duro. Untuk landasan dengan ketebalan >1”, menggunakan laminasi antara pelat baja dengan karet. Diperlukan aging test bahan karet sesuai ASTM 573, dimana pemuluran sampai putus 50%, perubahan kuat tarik maks 15%, kekerasan maks 10 HS. Bahan polymer dalam campuran karet tidak boleh lebih dari 60% terhadap volume total Elastomer.

Pondasi adalah bagian dari struktur jembatan yang berfungsi memikul bangunan bawah serta melimpahkannya kelapisan tanah pendukung.

### 3.3 Beton Prategang

Beton merupakan Campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Sedangkan beton prategang merupakan beton bertulang dimana tegangan dalam diberikan untuk mereduksi tegangan tarik potensial dalam beton yang dihasilkan dari beban, dan untuk pelat dua arah menggunakan dengan sekurang-kurangnya tulangan minimum prategang (SNI 2874:2019,2019). Komisi ACI (American Concrete Institute) mengenai beton prategang yaitu beton yang mengalami tegangan internal dengan besar dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal.

Sesuai dengan perkembangan teknologi beton yang demikian pesat, ternyata kriteria beton mutu tinggi juga selalu berubah sesuai dengan kemajuan tingkat mutu yang berhasil dicapai. Pada tahun 1950an, beton dengan kuat tekan 30 MPa sudah dikategorikan sebagai beton mutu tinggi. Pada tahun 1960an hingga awal 1970an, kriterianya lebih lazim menjadi 40 MPa. Saat ini, disebut mutu tinggi untuk kuat tekan diatas 50 MPa, dan 80 MPa sebagai beton mutu sangat tinggi, sedangkan 120 MPa bisa dikategorikan sebagai beton bermutu ultra tinggi.

#### 3.3.1 Konsep Dasar Tegangan Beton Prategang

Gaya prategang  $P$  yang memenuhi kondisi geometri dan pembebanan tertentu untuk suatu elemen, dapat ditentukan berdasarkan prinsip-prinsip mekanika dan hubungan tegangan-regangan serta terkadang dilakukan penyederhanaan yang mengasumsikan diasumsikan bersifat homogen dan elastis. Pemberian gaya prategang secara longitudinal sejajar sumbu komponen struktur dikenal sebagai pemberian prategang linier. Pemberian gaya prategang dapat dilakukan sebelum atau sesudah beton dicor. Pemberian gaya prategang sebelum pengecoran beton disebut sebagai sistem pratarik (*pre-tension*) dan pemberian gaya prategang sesudah dilakukan pengecoran disebut sebagai sistem pasca-tarik (*posttension*).

#### 3.3.2 Tegangan pada Beton Prategang

Dengan menganggap penampang bebas retak pada tingkat beban kerja, maka selurauh penampang memikul tegangan yang terjadi, sehingga seluruh luas beton



dapat diperhitungkan dalam menentukan kedudukan pusat berat dan momen inersia penampang. Pada dasarnya, baik pada sistem pratarik maupun sistem paskatarik, pola tegangan umumnya ditinjau / diperiksa pada dua keadaan yang berbeda, yaitu saat awal (saat transfer) dan saat akhir / layan (saat *service*).

#### 1. Kondisi Saat Transfer (Kondisi Awal)

Kondisi awal atau kondisi transfer merupakan pemeriksaan tegangan pada saat pelimpahan gaya prategan (penarikan tendon pada sistem paskatarik, pemotongan tendon pada sistem pratarik). Beban – beban yang diperhitungkan, yaitu :

- a. Gaya prategang awal  $P_0$  (gaya prategang sebelum terjadi kehilangan tegangan / gaya prategang).
- b. Beban berat sendiri *box girder* ( $M_0$ ).

Adapun tegangan – tegangan yang terjadi pada tengah bentang adalah sebagai berikut.

Tegangan pada serat atas

$$f_t = -\frac{P_0}{A_c} + \frac{P_0 e}{S_a} - \frac{M_0}{S_a} \quad (3.1)$$

Tegangan pada serat bawah

$$f_b = -\frac{P_0}{A_c} - \frac{P_0 e}{S_b} + \frac{M_0}{S_b} \quad (3.2)$$

Keterangan :

- $f_t$  = Tegangan pada serat atas  
 $f_b$  = Tegangan pada serat bawah  
 $P_0$  = Gaya prategang awal  
 $A_c$  = Luas penampang balok  
 $e$  = Eksentrisitas tendon tengah bentang  
 $S_a$  = Modulus penampang bagian atas  
 $S_b$  = Modulus penampang bagian bawah  
 $M_0$  = Momen akibat berat sendiri balok

## 2. Kondisi saat Akhir ( Kondisi Layan / Service)

Pemeriksaan tegangan pada saat keadaan akhir (layan) adalah pemeriksaan pada saat seluruh beban transversal sudah bekerja. Penampang yang digunakan untuk perhitungan propertis yaitu penampang transformasi untuk tendon terekat (*bounded*) dan penampang *netto* untuk tendon tak terekat (*unbounded*). Adapun beban-beban yang bekerja / diperhitungkan, yaitu :

- a. Gaya prategang efektif  $P_e$  (gaya prategang setelah terjadi seluruh kehilangan gaya prategang akibat kehilangan jangka pendek dan jangka panjang.

$$P_e = R \cdot P_0$$

dengan,

$R$  = rasio kehilangan =  $1 - LOF$

$LOF$  = kehilangan gaya prategang total, dimana persentase kehilangan prategang paskatarik sebesar  $\pm 20\%$

$P_e$  = Gaya prategang efektif

$P_0$  = Gaya prategang awal

- b. Seluruh beban eksternal telah bekerja, seperti beban berat sendiri, beban mati dan beban hidup atau dengan momen total yang bekerja saat layan  $M_T$ .

Adapun tegangan – tegangan yang terajdi di akhir di tengah bentang, yaitu :

Tegangan pada serat atas

$$f_t = - \frac{P_e}{A_c} + \frac{P_e e}{S_a} - \frac{M_T}{S_a} \quad (3.3)$$

Tegangan pada serat bawah

$$f_b = - \frac{P_e}{A_c} - \frac{P_e e}{S_b} + \frac{M_T}{S_b} \quad (3.4)$$

Keterangan :

$f_t$  = Tegangan pada sera atas

$f_b$  = Tegangan pada serat bawah

$A_c$  = Luas penampang balok

$e$  = Eksentrisitas tendon tengah bentang

$S_a$  = Modulus penampang bagian atas

- $S_b$  = Modulus penampang bagian bawah  
 $P_e$  = gaya prategang efektif.  
 $M_T$  = momen total yang bekerja saat kondisi layan.

### 3.3.3 Tegangan pada Beton Prategang

Menurut RSNI-T-12-2004, tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur dan tegangan ijin tendon prategang, adalah sebagai berikut.

1. Saat Kondisi Transfer (Kondisi Awal)
  - a. Serat terluar mengalami tegangan tekan ( $f_{ci}$ )  $\leq 0,60 f'_{ci}$
  - b. serat terluar mengalami tegangan tarik ( $f_{ti}$ )  $\leq 0,25 \sqrt{f'_{ci}}$
2. Saat Kondisi Akhir (Kondisi Layan / Service)
  - a. Serat terluar mengalami tegangan tekan ( $f_{cs}$ )  $\leq 0,45 f'_c$
  - b. serat terluar mengalami tegangan tarik ( $f_{ts}$ )  $\leq 0,5 \sqrt{f'_c}$
3. Tegangan ijin tendon prategang ( $f_{ps}$ )
  - a. Akibat gaya pengankuran tendon  $\leq 0,94 f_{py}$  tetapi tidak lebih besar dari  $0,85 f_{pu}$ .
  - b. Sesaat setelah pemindahan gaya prategang  $\leq 0,82 f_{py}$  tetapi tidak lebih besar dari  $\leq 0,74 f_{pu}$ .
  - c. Tendon paskatarik, pada daerah sambungan dan angkur, sesaat setelah penyaluran gaya  $\leq 0,70 f_{pu}$
  - d. Untuk kondisi layan sebesar  $\leq 0,60 f_{pu}$ .

### 3.3.4 Tata Letak Tendon (*Layout Tendon*)

Penampang suatu balok prategang di atas dua tumpuan ditentukan oleh tampang dimana terjadi momen-momen maksimum dan tampak ujung balok. Pada daerah ini tendon (ekuivalen cgs) diletakkan sedekat mungkin sisi balok bawah, agar diperoleh  $M_o$  agar saat transfer tidak terjadi tegangan tarik  $> f_{ti}$ . Pada ujung balok perencanaan dilakukan dengan melihat luas yang diperlukan untuk perlawanan terhadap geser, letak plat bantalan, jarak angkur dan jarak dongkrak. Oleh karena itu pada ujung balok  $M = 0$ , tendon sebaiknya diletakkan di dalam kern agar tidak terjadi tegangan tarik atau tendon diletakkan sedemikian agar cgs berimpit dengan cgc yang memberikan tegangan merata.

$$\text{Radius girasi, } r^2 = \frac{I_x}{A_c} \quad (3.5)$$

$$\text{Batas kern atas, } k_t = \frac{r^2}{y_a} \quad (3.6)$$

$$\text{Batas kern bawah, } k_b = \frac{r^2}{y_b} \quad (3.7)$$

Keterangan :

$I_x$  = Inersia penampang

$A_c$  = Luas penampang

$y_a$  = Titik berat bagian atas

$y_b$  = Titik berat bagian bawah

Berarti letak tendon (*cgs*) dipengaruhi oleh besar momen pada setiap titik, yang berarti eksentrisitas tendon  $e$  berubah sesuai dengan besar momen. Perencanaan tata letak tendon dilakukan dengan peninjaun sebagai berikut.

1. Batas bawah didasarkan saat transfer agar tegangan pada serat atas tegangan ijin. Lengan minimum dari kopel tendon.

$$a_{min} = \frac{M_0}{P_i} \quad (3.8)$$

Batas eksentrisitas bawah,

$$e_b = a_{min} + k_b \quad (3.9)$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik,

$$e_{b'} = \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot k_b}{P_i} \quad (3.10)$$

$$e_{b1} = e_b + e_{b'} = a_{min} + k_b + e_{b'} \quad (3.11)$$

2. Batas atas didasarkan saat layan. Jika tendon diletakkan diluar batas ini maka beban yang dapat dipikul berkurang atau tegangan serat bawah yang terjadi > tegangan ijin.

$$a_{max} = \frac{M_T}{P_e} \quad (3.12)$$

Batas eksentrisitas bawah,

$$e_t = a_{max} + k_t \quad (3.13)$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik,

$$e_{t'} = \frac{f_{ts} \cdot A_c \cdot k_t}{P_e} \quad (3.14)$$

$$e_{tI} = e_t + e_{t'} = a_{max} + k_t + e_{t'} \quad (3.15)$$

### 3.3.5 Kehilangan Gaya Prategang (*Lost of Prestress*)

Tegangan pada tendon beton prategang berkurang secara kontinu seiring dengan waktu. Total pengurangan tegangan ini disebut kehilangan prategang total. Kehilangan prategang total ini adalah faktor utama yang mengganggu perkembangan awal beton prategang. Kehilangan gaya prategang dapat digolongkan menjadi 2 yaitu, kehilangan langsung (*immediate*) dan kehilangan yang bergantung dengan waktu (*time depending lost*).

#### 1. Kehilangan Gaya Prategang Langsung

Kehilangan gaya prategang langsung dapat diakibatkan oleh beberapa hal antara lain pergeseran ankur, gesekan (friksi), dan perpendekan elastisitas beton.

##### a. Pergeseran Angkur (A)

Menurut Lin dan Burns (2000), bahwa kehilangan gaya prategang karena slip ankur pada komponen pascatarik diakibatkan adanya blok-blok pada ankur pada saat pendongkrak disalurkan ke ankur. Cara mudah untuk mengatasi kehilangan ini adalah dengan memberikan kelebihan tegangan.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta A}{L} \cdot E_s \quad (3.16)$$

Dimana,

$\Delta A$  = deformasi pengangkuran / slip,

$E_s$  = modulus elastik kabel,

$L$  = panjang tendon.

##### b. Friksi / Gesekan (F)

Kehilangan prategang akibat friksi merupakan kehilangan prategang pada struktur pascatarik yang terjadi akibat gesekan antara tendon dengan beton dikelilinginya karena proses pengangkuran (*jacking*). Kehilangan tegangan struktur prategang pada tendon yang melengkung dipengaruhi oleh efek kelengkungan (*curvature effect*) dan deviasi lokal dipengaruhi oleh efek kelengkungan (*curvature effect*) dan deviasi lokal alinyemen tendon yang disebut dengan efek "Wobble". Dengan

menggabungkan efek kelengkungan dan efek *Wobble*, maka persamaan kehilangan prategang akibat friksi adalah sebagai berikut.

$$\Delta f_{pf} = f_{pj} e^{-\Sigma(\mu\alpha + kL)} \quad (3.17)$$

dimana,

- $f_{pj}$  = Tegangan baja saat *jacking*  
 $e$  = Bilangan natural  
 $\mu$  = Koefisien gesek (*friction*) kelengkungan  
 $\alpha$  = Sudut kelengkungan tendon  
 $k$  = Koefisien *Wobble*  
 $L$  = Panjang lintasan tendon

Besaran nilai koefisien *Wobble* ( $k$ ) dan koefisien gesek kelengkungan ( $\mu$ ) pada penarikan tendon pascatarik dapat dilihat pada **Tabel 3.2** berikut ini.

**Tabel 3.2 Koefisien *Wobble* dan Koefisien Gesek Kelengkungan**

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

(Sumber : Nawy,2001)

c. Pemendekan elastis beton (ES)

Beton memendek akibat adanya gaya prategang yang bekerja pada tendon. Tendon akan kembali seperti semula setelah proses penarikan. Perilaku tersebut juga menyebabkan perubahan panjang pada beton. Pemendekan elastis beton akibat gaya prategang pascatarik dapat diperoleh dari persamaan 3.18 berikut.

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j \quad (3.18)$$

Dimana  $n$  adalah banyaknya jumlah tendon yang ditarik dan  $j$  menunjukkan nomor operasi pendongkrakan.

## 2. Kehilangan Prategang Jangka Panjang (Pengaruh Waktu)

Kehilangan prategang seiring berjalannya waktu disebabkan oleh proses penuaan beton selama pemakaian, Proses ini terutama dipengaruhi oleh adanya susut dan rangkak pada beton sepanjang umur pemakaian. Disamping kedua hal tersebut, kehilangan tegangan juga dipengaruhi oleh adanya relaksasi pada baja prategang.

### a. Rangkak Beton (CR)

Deformasi atau aliran lateral akibat tegangan longitudinal disebut rangkak (*creep*). Tegangan rangkak dan kehilangan tegangan hanya terjadi akibat beban yang terus menerus selama riwayat pembebanan suatu elemen struktural. Pada komponen struktur pascatarik *nonbonded*, kehilangannya dapat dipandang seragam di sepanjang bentangnya. Dengan demikian, nilai rata-rata untuk tegangan beton  $f_{cs}$ , di antara titik-titik angkur dapat digunakan untuk menghitung rangkak di komponen struktur pascatarik. Untuk menghitung kehilangan akibat rangkak pada dasarnya sama dengan Persamaan 3.19 berikut.

$$\Delta f_{pCR} = n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \quad (3.19)$$

Dimana,

$K_{CR}$  = 2,0 untuk komponen struktur pratarik  
 1,6 untuk komponen struktur pascatarik  
 $n$  = Rasio modulus

$f_{cs}$  = Tegangan beton pada level pusat berat baja setelah transfer

$f_{csd}$  = Tegangan beton pada level pusat berat baja akibat semua beban mati tambahan yang bekerja setelah prategang diberikan.

### b. Susut Beton (SH)

Sepertihalnya pada rangkak beton, besarnya susut pada beton dipengaruhi oleh beberapa faktor. Untuk komponen struktur pascatarik, kehilangan beton prategang akibat susut agak kecil karena sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pascatarik. Metode yang digunakan dalam menentukan kehilangan prategang akibat pengaruh



susut adalah metode perawatan basah. Persamaan yang digunakan dapat dilihat pada persamaan 3.20 dan 3.21 berikut.

Metode perawatan basah,

$$(\epsilon_{SH})_t = \frac{t}{35 + t} (\epsilon_{SH})_U \quad (3.20)$$

Kehilangan prategang akibat susut,

$$\Delta f_{pSH} = (\epsilon_{SH})_t \cdot E_s \quad (3.21)$$

Keterangan :

$(\epsilon_{SH})_U$  = Regangan susut ultimit sebesar  $820 \cdot 10^{-6}$  mm/mm (Nawy, 2001).

c. Relaksasi tendon prategang ( R )

Menurut Nawy (2001), bahwa relaksasi pada tendon mengalami tegangan tarik dalam waktu yang cukup lama. Besar pengurangan prategang bergantung tidak hanya pada durasi gaya prategang yang ditahan (t), melainkan juga pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang ( $f_{pi} / f_{py}$ ). Persamaan yang digunakan untuk mencari kehilangan prategang akibat relaksasi menggunakan persamaan 3.22 berikut.

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} (\log t/45) \cdot ((f_{ps}/f_{py}) - 0.55) \quad (3.22)$$

Dimana,

$f_{pi}$  = Tegangan awal tendon

$f_{py}$  = Kuat leleh tendon prategang

t = Umur rencana jembatan 50 tahun (jam)

### 3.4 Baja Prategang

Prategang pada dasarnya merupakan suatu beban yang menimbulkan tegangan dalam awal sebelum pembebanan luar dengan besar dan distribusi tertentu bekerja sehingga tegangan yang dihasilkan dari beban luar dilawan sampai tingkat yang diinginkan. Gaya prategang dihasilkan dengan menarik kabel tendon yang ditempatkan pada beton dengan alat penarik. Setelah penarikan tendon mencapai gaya/tekanan yang direncanakan, tendon ditahan dengan angkur, agar gaya tarik yang tadi dikerjakan tidak hilang. Penarikan kabel tendon dapat dilakukan baik

sebelum beton dicor (pre-tension) atau setelah beton mengeras (posttension). Baja (tendon) yang dipakai untuk beton prategang dalam prakteknya ada tiga macam, yaitu :

1. Kawat tunggal (wires), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan system pratarik (pre-tension).
2. Kawat untaian (strand), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan system pascatarik (post-tension).
3. Kawat batangan (bar), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan sistem pratarik (pre-tension).

### **3.5 Keuntungan dan Kerugian Beton Prategang**

Keuntungan beton prategang adalah sebagai berikut.

1. Tak ada retak terbuka, sehingga lebih tahan korosi.
2. Permukaan jembatan Lebih kedap air.
3. Ada chamber untuk mengurangi lendutan.
4. Penampang struktur lebih kecil/langsing, karena seluruh luas penampang dapat digunakan secara efektif.
5. Bisa digunakan untuk bentang lebih panjang dibandingkan beton bertulang.
6. berat baja prategang jauh lebih kecil daripada jumlah berat besi beton.

Kerugian beton prategang untuk adalah sebagai berikut.

1. Dituntut kualitas bahan yang lebih tinggi (pemakaian beton dan baja mutu yang lebih tinggi), yang harganya lebih mahal.
2. Dituntut keahlian dan ketelitian yang lebih tinggi.

### **3.6 Pembebanan**

Jembatan Grembyangan memiliki panjang 80 meter dan lebar 9 meter. Jembatan ini didirikan melintang di atas Kali Opak, Kabupaten Sleman. Analisis pembebanan pada jembatan digunakan untuk menentukan desain jembatan. Pembebanan mengacu pada standar SNI 1725:2016.

#### **3.6.1 Beban Permanen**

Beban permanen pada jembatan ada dua, yaitu berat sendiri dan beban mati tambahan (*utilitas*). Beban permanen ini akan diterima oleh jembatan selama masa layan jembatan.

### 1. Berat sendiri (MS)

Berat sendiri merupakan berat dari bagian jembatan dan elemen – elemen struktur jembatan lainnya. Sebagaimana yang dimaksud elemen struktural adalah berat bahan dan bagian jembatan ditambah dengan elemen nonstruktural yang dianggap tetap. Adapun berat isi yang digunakan untuk berat sendiri dapat dilihat pada **Tabel 3.3**.

**Tabel 3.3 Berat Isi Untuk Beban Mati**

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m <sup>3</sup> )	Kerapatan Massa (kg/m <sup>3</sup> )
1	Lapisan permukaan beraspal	22,0	2245
2	Besi tuang	71,0	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan	17,2	1755
4	Kerikil dipadatkan	18,8 – 22,7	1920 – 2315
5	Beton aspal	22,0	2245
6	Beton ringan	12,25 – 19.6	1250 – 2000
7	Beton $f'c < 35$ Mpa	22,0 – 25,0	2320
	$35 < f'c < 105$ Mpa	$22 + 0,022 f'c$	$2240 + 2,29 f'c$
8	Baja	78,5	7850
9	Kayu (ringan)	7,8	800
10	Kayu keras ( <i>hard wood</i> )	11,0	1125

(Sumber: SNI 1725:2016)

### 2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan merupakan berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan. Beban mati tambahan pada jembatan dapat berupa lapisan aspal, trotoar, pagar, dan lampu penerangan jalan umum.

### 3. Pengaruh Susut dan Rangkak

Pengaruh rangkak dan penyusutan harus diperhitungkan dalam perencanaan jembatan beton. Pengaruh ini dihitung menggunakan beban mati jembatan. Apabila rangkak dan penyusutan bisa mengurangi pengaruh muatan lainnya, maka nilai dari rangkak dan penyusutan tersebut harus diambil minimum. Faktor beban akibat pengaruh susut dan rangkak dapat dilihat pada **Tabel 3.3** berikut.

**Tabel 3.4 Faktor Beban Akibat Susut dan Rangkak**

Tipe Beban	Faktor Beban ( $\gamma_{PR}$ )	
	Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{SH}^S$ )	Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{SH}^U$ )
Tetap	1,0	0,5

#### 4. Pengaruh Prategang

Prategang akan menyebabkan pengaruh sekunder pada komponen-komponen yang terkekang pada bangunan statis tidak tentu. Pengaruh sekunder tersebut harus diperhitungkan baik pada batas daya layan ataupun batas ultimit. Prategang harus diperhitungkan sebelum (selama pelaksanaan) dan sesudah kehilangan tegangan dalam kombinasinya dengan beban-beban lainnya. Pengaruh utama prategang adalah sebagai berikut.

1. Pada keadaan batas daya layan, gaya prategang dapat dianggap bekerja sebagai suatu sistem beban pada unsur. Nilai rencana dari beban prategang tersebut harus dihitung menggunakan faktor beban daya layan sebesar 1,0.
2. Pada keadaan batas ultimit, pengaruh sekunder akibat gaya prategang harus dianggap sebagai beban yang bekerja.

**Table 3.5 Faktor Beban Akibat Pengaruh Prategang**

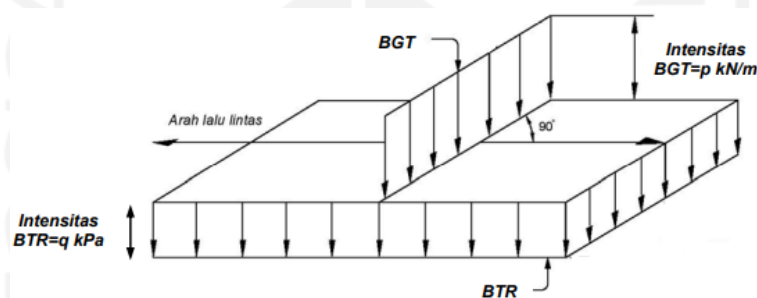
Tipe Beban	Faktor Beban ( $\gamma_{PR}$ )	
	Keadaan Batas Layan ( $\gamma_{PR}^S$ )	Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma_{PR}^U$ )
Tetap	1,0	1,0

#### 3.6.2 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas yang digunakan dalam perencanaan jembatan adalah beban truck "T" dan beban lajur "D". Beban lajur "D" bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur "D" yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri. Beban truk "T" adalah satu kendaraan berat dengan 3 gandar yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap gandar terdiri atas dua bidang kontak pembebanan yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Hanya satu truk "T" diterapkan per lajur lalu lintas rencana.

### 1. Beban Lajur “D” (TD)

SNI 1725:2016 Pasal 8.3.1, (2016) Beban lajur “D” terdiri dari Beban Terbagi Rata (BTR) yang digabung dengan Beban Garis Terpusat (BGT). Beban terbagi rata memiliki intensitas  $q$  kPa dengan besaran  $q$  tergantung pada panjang total yang dibebani  $L$ . Jika  $L \leq 30$  meter, maka  $q$  sebesar 0,9 kPa. Sedangkan jika  $L > 30$  meter, maka  $q$  sebesar  $0,9 (0,5 + \frac{15}{L})$  kPa. Beban Garis Terpusat (BGT) dengan intensitas  $\rho$  kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensitas  $\rho$  adalah 49,0 kN/m. Beban lajur “D” dapat dilihat pada **Gambar 3.1** berikut.



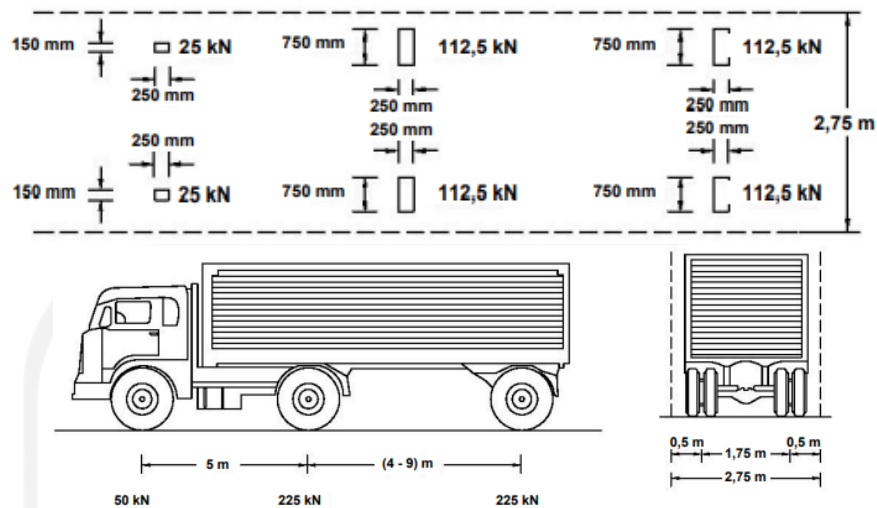
**Gambar 3.1** Beban Lajur “D”  
(Sumber: SNI 1725:2016)

### 2. Beban Truk “T” (TT)

Beban truk “T” tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban “D”. Beban truk dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai. Pembebanan truk “T” terdiri atas kendaraan truk semi-trailer yang mempunyai susunan dan berat gandar dapat dilihat pada **Gambar 3.2**. Berat dari tiap-tiap gandar disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 gandar tersebut bisa diubah-ubah dari 4,0 m sampai dengan 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan. Faktor beban “T” dapat dilihat pada **Tabel 3.6** berikut.

**Tabel 3.6** Faktor Beban untuk Beban “T”

Tipe beban	Jembatan	Faktor beban	
		Keadaan Batas Layan ( $\gamma^S_{II}$ )	Keadaan Batas Ultimit ( $\gamma^U_{II}$ )
Transien	Beton	1,00	1,80
	Box Girder Baja	1,00	2,00



**Gambar 3.2 Pembebanan Truk "T"**

(Sumber: SNI 1725:2016)

### 3. Faktor Beban Dinamis

Faktor Beban Dinamis (FBD) merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak dan jembatan. Untuk perencanaan, FBD dinyatakan sebagai beban statis ekuivalen. Untuk pembebanan truk "T", FBD diambil 30%. Nilai FBD yang dihitung digunakan pada seluruh bagian bangunan yang berada di atas permukaan tanah.

### 4. Gaya Rem (TB)

Gaya ini harus diasumsikan untuk bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm diatas permukaan jalan pada masingmasing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan. Untuk jembatan yang dimasa depan akan dirubah menjadi satu arah, maka semua lajur rencana harus dibebani secara simultan pada saat menghitung besarnya gaya rem. 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

### 3.6.3 Beban Akibat Aksi Lingkungan

#### 1. Beban Angin pada Struktur ( $EW_s$ )

Kecepatan angin rencana dasar yang berbeda digunakan untuk kombinasi pembebanan dengan tidak melibatkan kondisi beban angin yang bekerja pada

kendaraan. Arah angin rencana harus diasumsikan horizontal. Tekanan angin rencana dapat ditetapkan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$P_D = P_B \left( \frac{V_{DZ}}{V_B} \right)^2 \quad (3.23)$$

Keterangan :

$P_B$  : tekanan angin dasar

**Tabel 3.7 Tekanan Angin Dasar**

Komponen Bangunan Atas	Angin Tekan (MPa)	Angin Hisap (MPa)
Rangka, kolom dan pelengkung	0,0024	0,0012
Balok	0,0024	N/A
Permukaan datar	0,0019	N/A

Gaya total beban angin tidak boleh diambil kurang dari 4,4 kN/mm pada bidang tekan dan 2,2 kN/mm pada bidang hisap pada struktur rangka dan pelengkung, serta tidak kurang dari 4,4 kN/mm pada balok atau gelagar.

## 2. Beban Angin pada Kendaraan ( $EW_1$ )

Tekanan angin rencana harus dikerjakan baik pada struktur jembatan maupun pada kendaraan yang melintasi jembatan. Jembatan harus direncanakan memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan, dimana tekanan tersebut harus diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 1800 mm diatas permukaan jalan. Kecuali jika ditentukan didalam pasal ini, jika angin yang bekerja tidak tegak lurus struktur, maka komponen yang bekerja tegak lurus maupun paralel terhadap kendaraan untuk berbagai sudut serang dapat diambil seperti yang ditentukan dalam **Tabel 3.8** berikut.

**Tabel 3.8 Komponen Beban Angin yang Bekerja pada Kendaraan**

Sudut (derajat)	Komponen Tegak Lurus (N/mm)	Komponen Sejajar (N/mm)
0	1,46	0
15	1,28	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55



### 3.6.4 Beban Akibat Gempa

Jembatan yang berlokasi di zona gempa 2, 3, dan 4, hold down devices harus disediakan pada perletakan dan pada lokasi sendi untuk struktur menerus dimana gaya gempa vertikal akibat gaya gempa longitudinal melebihi 50% dan kurang dari 100% reaksi vertikal akibat beban permanen. Dalam hal ini, gaya angkat efektif untuk perencanaan hold down devices diambil 10% dari reaksi akibat beban permanen bila bentang jembatan berupa bentang sederhana.

Jika gaya gempa vertikal menghasilkan gaya angkat efektif, maka hold down devices harus direncanakan untuk menahan nilai terbesar dari :

1. 120% dari perbedaan antara gaya gempa vertikal dan reaksi akibat beban permanen
2. 10% reaksi akibat beban permanen

### 3.7 Lentutan (Deflection) dan Chamber

Lentutan pada balok prategang tergantung dari kombinasi gaya prategang, beban luar dan lama pembebanan. Gaya prategang akan menimbulkan lentutan ke atas (*chamber*), sedangkan beban luar akan menimbulkan lentutan ke bawah.

Kontrol lentutan dilakukan pada saat transfer dan pada saat servis. Pada saat transfer dimana beban berat sendiri yang bekerja terjadi lentutan keatas yang disebabkan oleh tekanan tendon ke atas pada waktu penarikan kabel prategang. Lentutan yang terjadi diimbangi oleh beban servis sehingga menimbulkan lentutan pada balok dan diharapkan lentutan yang terjadi tidak melebihi lentutan maksimum yang diijinkan. Lentutan maksimum yang diijinkan adalah  $L/250$ , dimana  $L$  adalah panjang bentang balok. Untuk lentutan ke atas akibat gaya prategang pada *simple beam* dihitung dengan rumus:

$$\delta_c = \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \quad (3.25)$$

Untuk lentutan dengan beban merata dapat dihitung dengan rumus:

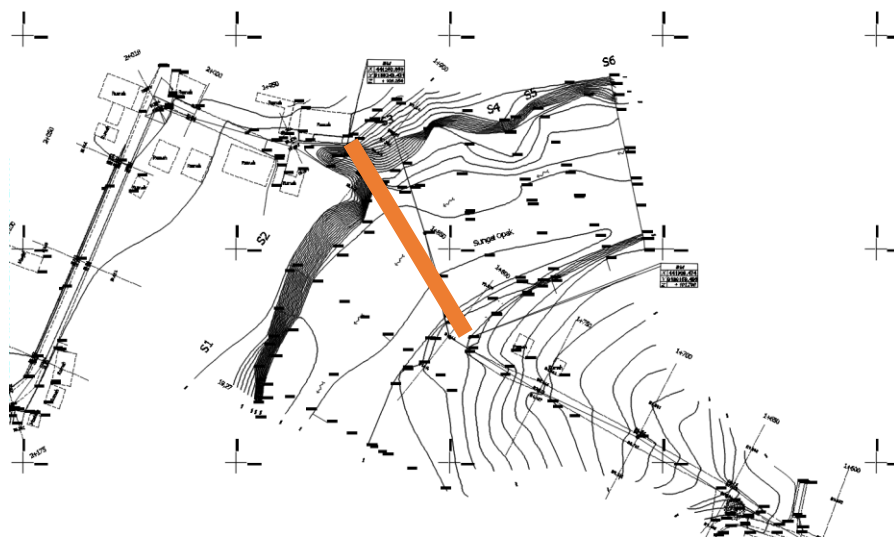
$$\delta_D = \frac{5}{384} \cdot \frac{w \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \quad (3.26)$$

## BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

Jembatan Gremyangan merupakan jembatan yang menghubungkan Kepanewon Berbah dan Kepanewon Prambanan. Selain itu, jembatan tersebut juga penghubung untuk akses menuju Tempat Pemakaman Umum (TPU). Lokasi jembatan tersebut berada di Kebondalem, Madurejo, Kecamatan Prambanan, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55572. Lokasi dan topografi Jembatan Gremyangan dapat dilihat pada **Gambar 4.1** dan **Gambar 4.2**.



**Gambar 4.1 Lokasi Jembatan Gremyangan**

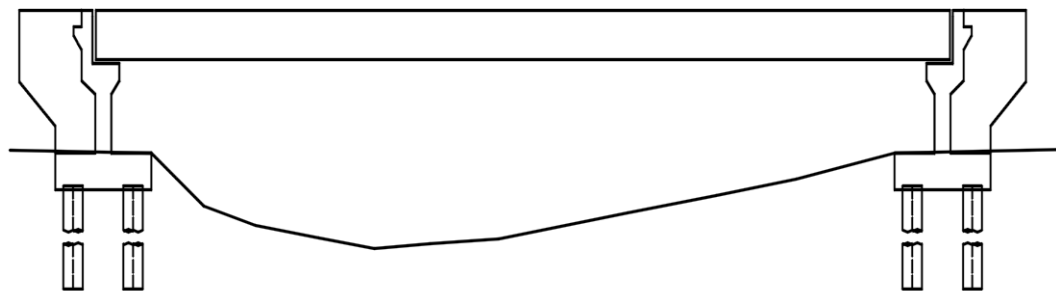


**Gambar 4.2 Data Topografi Jembatan Gremyangan**

Jembatan Grebyangan memiliki panjang bentang 80 meter dengan lebar jembatan 9 meter yang dibangun melintang diatas Kali Opak. Gelagar jembatan tersebut dibangun dengan menggunakan gelagar I prategang dengan pilar di tengah bentang jembatan. Spesifikasi dimensi jembatan dilakukan dengan pengukuran langsung di Jembatan Grebyangan. Berikut merupakan data teknis yang didapatkan berdasarkan hasil pengukuran di Jembatan Grebyangan.

1. Panjang jembatan = 80 meter
2. Tinggi jembatan = 10 meter
3. Lebar lajur lalu lintas = 6 meter
4. Lebar trotoar = 1,5 meter
5. Lebar total jembatan = 9 meter

Pembangunan Jembatan Grebyangan yang melintang diatas Kali Opak dengan pilar di tengah bentang dikhawatirkan akan terjadi kerusakan pada pilar jembatan. Kerusakan pada pilar jembatan tersebut dapat terjadi akibat gerusan dan sedimentasi dari aliran air, atau bisa karena aliran lahar dingin akibat erupsi dari Gunung Merapi. Untuk mencegah terjadinya kerusakan jembatan yang fatal akibat aliran air maupun lahar di kali Opak, maka Jembatan Grebyangan dapat dibangun dengan desain alternatif gelagar dan tanpa menggunakan pilar di tengah bentang.

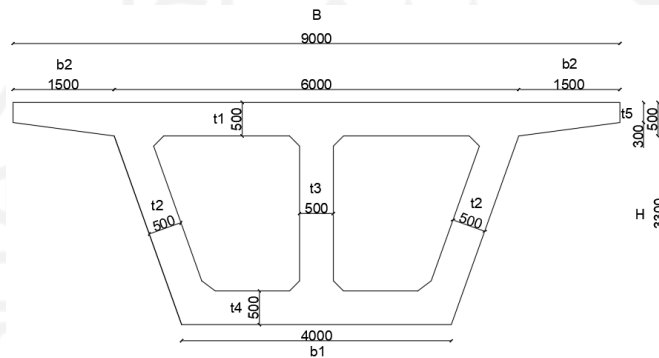


**Gambar 4.2 Penampang Memanjang Jembatan**

Desain alternatif gelagar Jembatan Grebyangan dapat menggunakan *box girder* prategang dengan menggunakan penampang *box girder* trapesium atau penampang *box girder* persegi. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan kedua penampang gelagar *box girder* dari segi dimensi penampang, jumlah tendon yang digunakan, jumlah strand yang digunakan, kapasitas momen,

lendutan, volume beton dan tulangan masing - masing penampang. Adapun data untuk dimensi penampang *box girder* trapesium maupun *box girder* persegi adalah berdasarkan asumsi dengan acuan data teknis yang diukur dilapangan dan desain *box girder* dari katalog *bridge* PT. Wijaya Karya. Asumsi dimensi *box girder* prategang penampang trapesium dan persegi sebagai berikut.

1. Penampang trapesium *box girder*

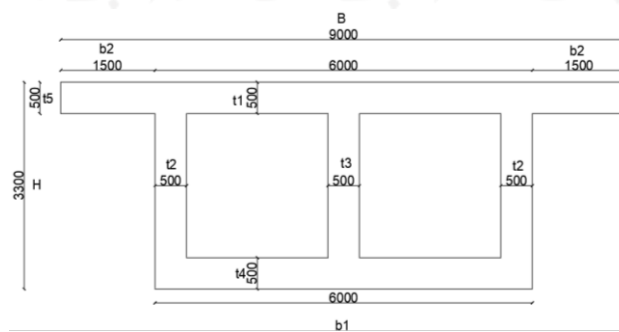


**Gambar 4.4 Penampang Box Girder Trapesium**

Keterangan :

Lebar total girder (B)	= 9 meter
Lebar bawah girder (b1)	= 4 meter
Lebar trotoar (b2)	= 1,5 meter
Tinggi girder (H)	= 3,3 meter
Tebal pelat lantai (t1)	= 0,5 meter
Tebal badan samping box (t2)	= 0,5 meter
Tebal tengah box (t3)	= 0,5 meter
Tebal bawah box (t4)	= 0,5 meter
Tebal pelat trotoar (t5)	= 0,5 meter

2. Penampang persegi *box girder*



**Gambar 4.5 Penampang Box Girder Persegi**

Keterangan :

Lebar total girder (B)	= 9 meter
Lebar bawah girder (b1)	= 4 meter
Lebar trotoar (b2)	= 1,5 meter
Tinggi girder (H)	= 3,3 meter
Tebal pelat lantai (t1)	= 0,5 meter
Tebal badan samping box (t2)	= 0,5 meter
Tebal tengah box (t3)	= 0,5 meter
Tebal bawah box (t4)	= 0,5 meter
Tebal pelat trotoar (t5)	= 0,5 meter

Sebelum melakukan analisis perbandingan *box girder*, dilakukan studi literatur yang akan digunakan sebagai acuan maupun referensi dalam analisis perbandingan *box girder*. Studi literatur dilakukan dari studi penelitian terdahulu dan peraturan – peraturan jembatan yang digunakan saat ini. Adapun studi literatur yang digunakan sebagai acuan maupun referensi sebagai berikut.

1. Peraturan untuk beton prategang jembatan menggunakan RSNI T – 12 – 2004.
2. Peraturan pembebanan pada jembatan menggunakan SNI 1725:2016.
3. Peraturan baja prategang menggunakan ASTM A416M – 16.
4. Peraturan gempa untuk jembatan menggunakan SNI 2833–2016.
5. Peraturan beton prategang menggunakan ACI 318–14.
6. Peraturan kehilangan prategang akibat rangkai dan susut menggunakan ACI 209.2R – 08.
7. Katalog untuk prategang menggunakan *VSL Strand Post-Tensioning System*.

Jika studi literatur sudah dilakukan, maka dapat dilakukan analisis perbandingan *box girder* prategang penampang trapesium dengan *box girder* prategang penampang persegi. Analisis dilakukan dengan menentukan spesifikasi desain jembatan. Spesifikasi desain jembatan meliputi *properties* penampang *box girder* dan karakteristik material yang akan digunakan. *Properties* penampang *box girder* yang dihitung yaitu :

1. Dimensi *box girder*
2. Luas tampang *box girder* (A)
3. Titik berat *box girder* (y)
4. Statis momen
5. Momen inersia (I)

Sedangkan untuk karakteristik material yang digunakan yaitu :

1. Mutu beton ( $f'_c$ )
2. Mutu baja tulangan ( $f_y$ )
3. Mutu baja tendon prategang

Penentuan pembebanan pada jembatan mengacu pada Peraturan Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725:2016. Adapun beban yang digunakan pada analisis perbandingan *box girder* yaitu :

1. Beban mati sendiri (MS)
2. Beban mati tambahan (MA)
3. Beban pejalan kaki (TP)
4. Beban angin (EW)
5. Beban lajur "D" (TD)
6. Beban rem (TB)
7. Beban gempa (EQ)

Perhitungan *properties* penampang *box girder* meliputi luas penampang (A), titik berat (y), statis momen dan momen inersia (I). Setelah perhitungan *properties* penampang *box girder* dihitung, maka dapat dilanjutkan menghitung pembebanan pada *box girder*.

Acuan peraturan yang digunakan untuk melakukan analisis perhitungan beban yaitu Peraturan Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725:2016, sedangkan peraturan untuk beban gempa mengacu pada Peraturan Gempa untuk Jembatan SNI 2833:2016.

Perhitungan gaya prategang awal ditinjau pada dua keadaan, yaitu keadaan transfer dan keadaan layan (*service*). Tegangan izin beton prategang digunakan pada saat menghitung gaya prategang awal. Fungsi pembatasan tegangan izin pada

beton prategang agar tidak terjadi gaya tarik maupun tekan berlebih pada beton prategang.

Setelah gaya prategang awal diperoleh besaran nilainya, maka dilakukan perhitungan daerah aman tendon. Daerah aman tendon berfungsi untuk menentukan letak tendon yang akan digunakan agar tidak melebihi batas maksimum daerah aman tendon. Pengecekan daerah aman tendon meliputi batas atas ( $e_t$ ) dan batas bawah ( $e_b$ ). Jika tidak aman maka dapat diulangi pada tahap pertama yaitu perhitungan properties. Jika batas tendon sudah aman, maka dapat dilanjutkan tahap berikutnya yaitu kebutuhan tendon pada *box girder*.

Perhitungan kebutuhan tendon pada *box girder* dilakukan setelah mengetahui daerah aman tendon. Perhitungan tendon dilakukan untuk mengetahui jumlah tendon yang akan digunakan, posisi tendon dan kehilangan gaya prategang setelah adanya *jacking*.

Kehilangan gaya prategang dalam tendon untuk setiap waktu harus diambil sebagai jumlah dari kehilangan seketika dan kehilangan yang tergantung waktu. Kehilangan prategang yang tergantung waktu meliputi kehilangan jangka pendek dan kehilangan jangka panjang. Kehilangan jangka pendek diakibatkan oleh gesekan ankur, akibat gesekan dan akibat pemendekan elastis tendon. Sedangkan kehilangan jangka panjang diakibatkan oleh rangkai beton, akibat susut beton dan relaksasi tendon.

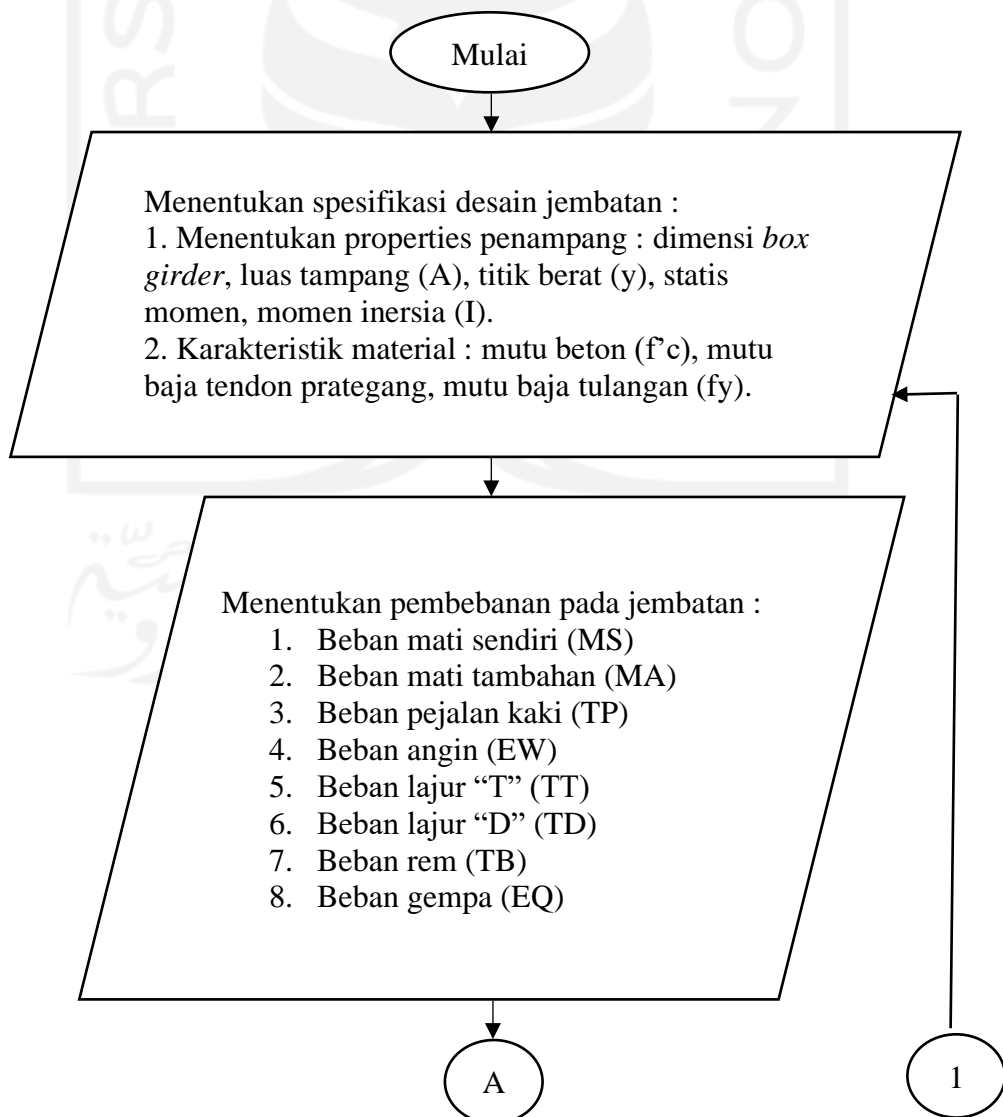
Tegangan yang terjadi pada *box girder* harus dihitung pada kondisi awal (*transfer*) dan kondisi layan (*service*). Tegangan yang terjadi tidak boleh melebihi tegangan izin beton prategang yang sudah ditentukan. Tegangan izin beton prategang meliputi tegangan izin tarik dan tegangan izin tekan, baik pada kondisi awal (*transfer*) maupun kondisi layan (*service*). Pengecekan tegangan yang terjadi pada *box girder* dilakukan apabila tegangan yang terjadi melebihi tegangan izin, maka perhitungan dapat diulangi pada tahap kedelapan yaitu menghitung kebutuhan tendon. Jika tegangan yang terjadi kurang dari tegangan izin, maka dapat dilakukan perhitungan pada tahap berikutnya yaitu menghitung kapasitas ultimit pada *box girder*.

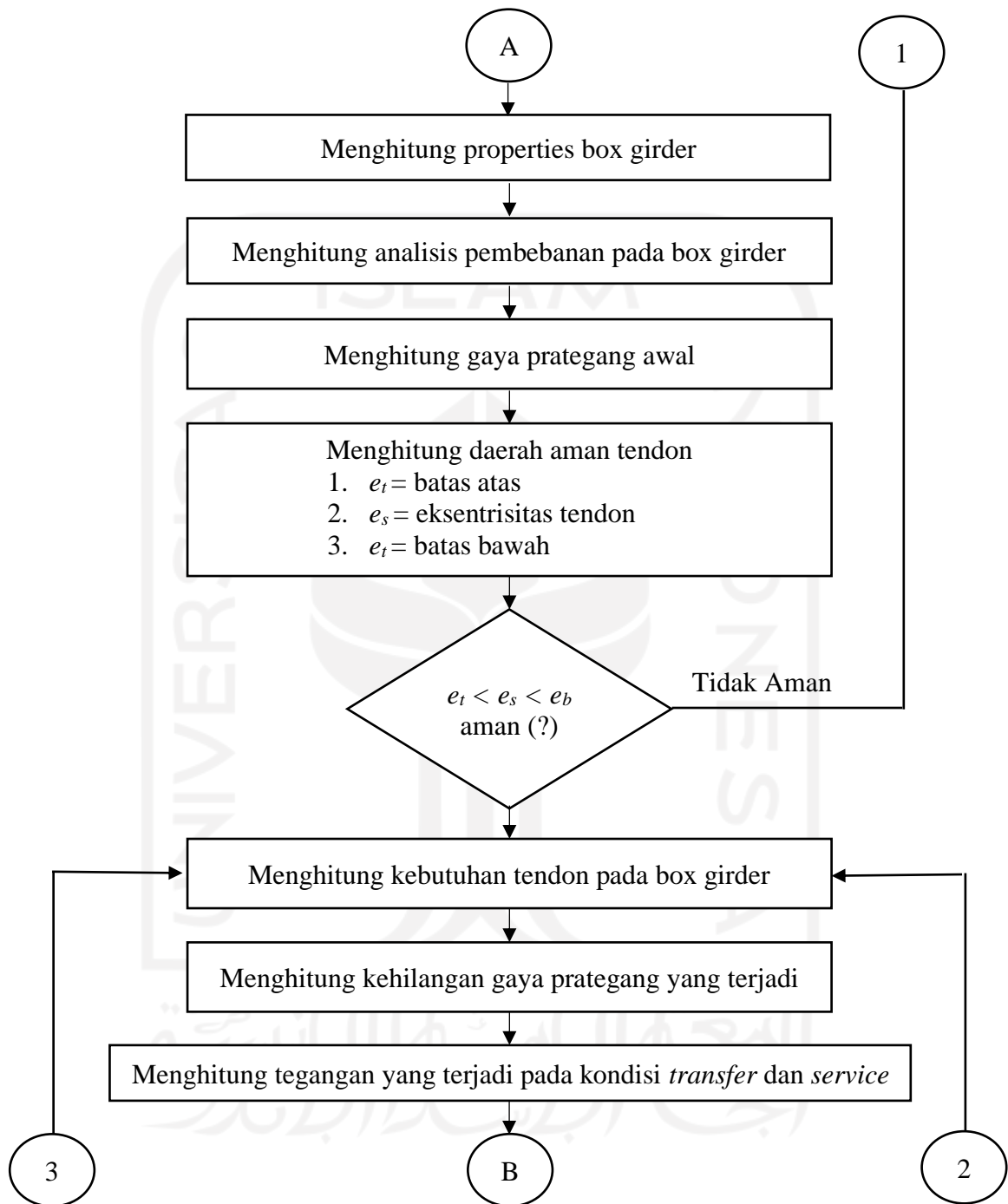


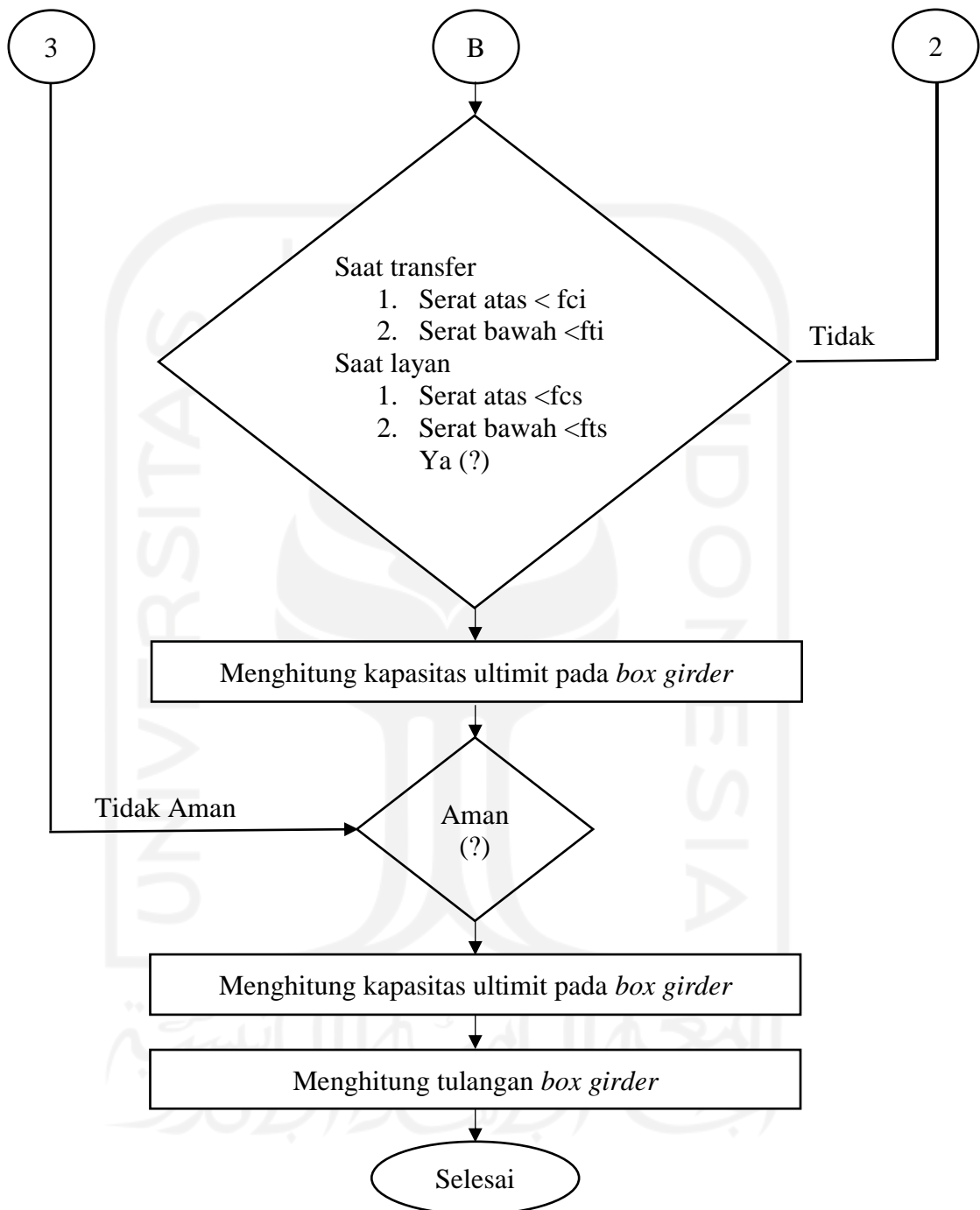
Momen ultimit merupakan batas keruntuhan elemen struktur. Momen ultimit dihitung untuk mengetahui batasan beban yang nantinya akan bekerja pada *box girder*. Beban yang bekerja pada *box girder* dihitung dengan mengkalikan dengan factor beban yang sesuai dengan peraturan SNI 1725:2016. Jika beban yang bekerja melebihi momen ultimit yang dihitung, maka perhitungan diulang pada tahap menentukan kebutuhan tendon prategang.

Lendutan pada *box girder* dihitung pada saat kondisi awal (*transfer*) dan kondisi layan (*service*). Pada saat kondisi awal (*transfer*), gaya prategang awal mempengaruhi lendutan keatas (*chamber*). Sedangkan pada kondisi layan (*service*), beban tambahan yang berkeja pada *box girder* mempengaruhi lendutan kebawah.

Untuk mempermudah memahami skema metode penelitian, berikut merupakan bagan alir penelitian yang akan dilakukan.





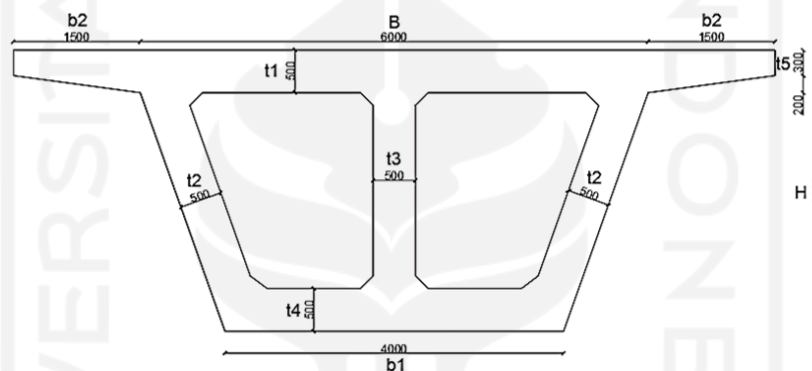


**Gambar 4.6 Bagan Alir Penelitian**

## BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Data Teknis dan Material Jembatan

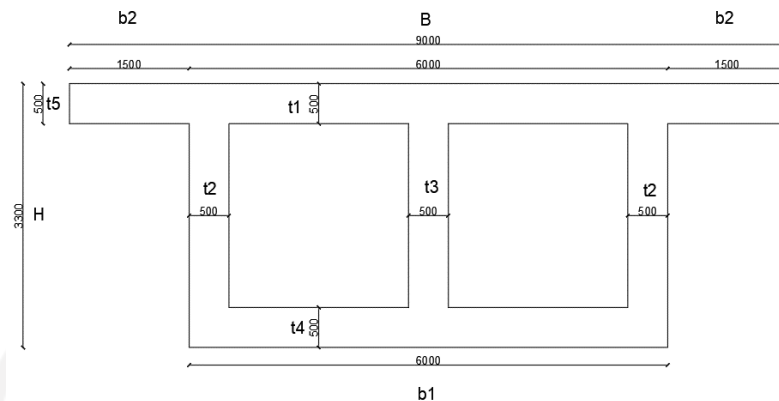
Kebutuhan dalam melakukan analisis penampang *box girder* sangat diperlukan untuk melakukan analisis. Data tersebut dapat meliputi dimensi penampang, mutu beton, mutu baja tulangan dan mutu tendon prategang. Data teknis jembatan prategang tipe *box girder* penampang melintang trapesium dan persegi dapat dilihat pada **Gambar 5.1** dan **Gambar 5.2**.



**Gambar 5.1** Penampang Melintang Box Girder Trapesium Prategang

Bagian – bagian *box girder* penampang trapesium pada **Gambar 5.1** adalah sebagai berikut.

- |                            |                |
|----------------------------|----------------|
| 1. Lebar total girder      | B = 9 meter    |
| 2. Lebar bawah girder      | b1 = 4 meter   |
| 3. Lebar trotoar           | b2 = 1,5 meter |
| 4. Tinggi girder           | H = 3,3 meter  |
| 5. Tebal pelat lantai      | t1 = 0,5 meter |
| 6. Tebal badan samping box | t2 = 0,5 meter |
| 7. Tebal tengah box        | t3 = 0,5 meter |
| 8. Tebal bawah box         | t4 = 0,5 meter |
| 9. Tebal pelat trotoar     | t5 = 0,3 meter |



**Gambar 5.2 Penampang Melintang Box Girder Persegi Prategang**

Bagian – bagian *box girder* penampang persegi pada **Gambar 5.2** adalah sebagai berikut.

- |    |                         |       |             |
|----|-------------------------|-------|-------------|
| 1. | Lebar total girder      | $B$   | = 9 meter   |
| 2. | Lebar bawah girder      | $b_1$ | = 6 meter   |
| 3. | Lebar trotoar           | $b_2$ | = 1,5 meter |
| 4. | Tinggi girder           | $H$   | = 3,3 meter |
| 5. | Tebal pelat lantai      | $t_1$ | = 0,5 meter |
| 6. | Tebal badan samping box | $t_2$ | = 0,5 meter |
| 7. | Tebal tengah box        | $t_3$ | = 0,5 meter |
| 8. | Tebal bawah box         | $t_4$ | = 0,5 meter |
| 9. | Tebal pelat trotoar     | $t_5$ | = 0,5 meter |

Material yang digunakan dalam perencanaan jembatan akan berpengaruh pada berat komponen masing-masing struktur jembatan. Beragamnya bahan yang digunakan untuk merencanakan ulang struktur atas Grindulu membuat perencana harus teliti dalam memperhitungkannya. Data material perencanaan meliputi beton, baja tulangan dan baja beton prategang.

- |    |                       |  |           |
|----|-----------------------|--|-----------|
| 6. | Beton                 |  |           |
|    | a.                    | Kuat tekan beton prategang ( $f'c$ )     | = 50 MPa  |
| 7. | Baja Tulangan         |  |           |
|    | a.                    | Mutu baja tulangan ulir diameter < 12 mm | = 240 MPa |
|    | b.                    | Mutu baja tulangan ulir diameter > 12 mm | = 240 MPa |
| 8. | Baja Tendon Prategang |  |           |

*Strands* baja pada tendon prategang menggunakan spesifikasi dari VSL *Strand Post Tensioning Systems* dengan peraturan yang mengacu pada ASTM A416. Adapun spesifikasi tendon dapat dilihat pada **Tabel 5.1** berikut ini.

**Tabel 5.1 Spesifikasi *Strands* Baja Prategang**

Jenis <i>strands</i>	<i>Strands 0,5" ASTM A-416 Grade 270</i>		
Kuat tarik <i>strands</i>	$f_{pu}$	1860	MPa
Tegangan leleh <i>strands</i>	$f_{py}$	1676	MPa
Diameter nominal <i>strands</i>	$d$	15,24	mm
Luas tampang nominal satu <i>strands</i>	$A_{st}$	182,41	mm <sup>2</sup>
Beban putus satu <i>strands</i>	$P_{bsl}$	260,65	kN
Jumlah kawat untaian ( <i>strands cable</i> )	$n$	32	<i>Strands/tendon</i>
Diameter selubung tendon		86,21	mm
Modulus elastis <i>strands</i>	$E_s$	195000	MPa

(Sumber: Tabel VSL *Vorspann System Losingel 0,6"*)

## 5. Berat Jenis Material

Material yang digunakan dan berat jenis material pada analisis perbandingan struktur atas Jembatan Grembyangan dapat dilihat pada **Tabel 5.2** berikut. Spesifikasi dan ketentuan yang digunakan berdasarkan SNI 1725:2016 pasal 7.1.

**Tabel 5.2 Material dan Berat Jenis Material**

Material	Kode	Berat Jenis (kN/m <sup>3</sup> )
Beton prategang	$w_c$	23,1
Beton bertulang	$w'c$	22
Air hujan	$w_{air}$	9,8
Aspal	$w_{aspal}$	22
Baja	$w_{baja}$	78,5

(Sumber: SNI 1725:2016)

## 5.2 Perencanaan Box Girder Prestressed

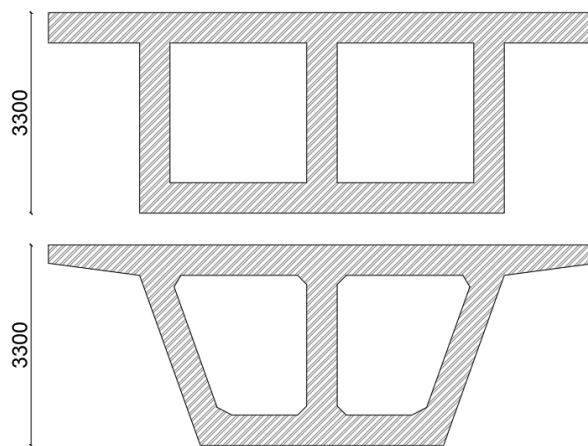
Struktur atas Jembatan Grembyangan direncanakan menggunakan penampang *box girder* prategang tipe persegi dan trapesium. Panjang total jembatan adalah 80 meter. Berikut ini merupakan tahapan perencanaan gelagar atas *box girder* prategang.

### 5.2.1 Mencari Tinggi *Box*

Berdasarkan RSNI T – 12 – 2004, tinggi penampang total struktur atas beton pratekan gelagar *box* ditentukan dari  $H > L/25$ . Dimana L merupakan Panjang total jembatan pada bentang sederhana. Tinggi total gelagar *box* pada Jembatan Grembyangan, yaitu :

$$\begin{aligned} \text{Tinggi } box &= L/25 \\ &= 80/25 \\ &= 3,2 \text{ meter} \end{aligned}$$

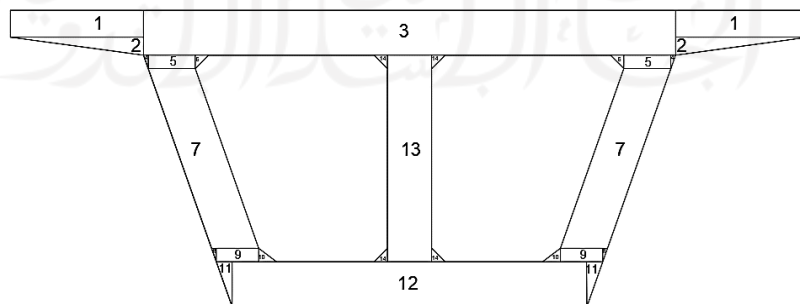
Maka tinggi total *box* termasuk dengan pelat adalah 3,3 meter.



**Gambar 5.3 Tinggi Penampang *Box Girder***

### 5.2.2 Properties Penampang *Box*

Properties *box girder* penampang trapesium dan persegi prategang dibagi menjadi beberapa luasan penampang. Hasil perhitungan properties penampang *box girder* dapat dilihat pada **Tabel 5.4** dan **Tabel 5.5** berikut ini.

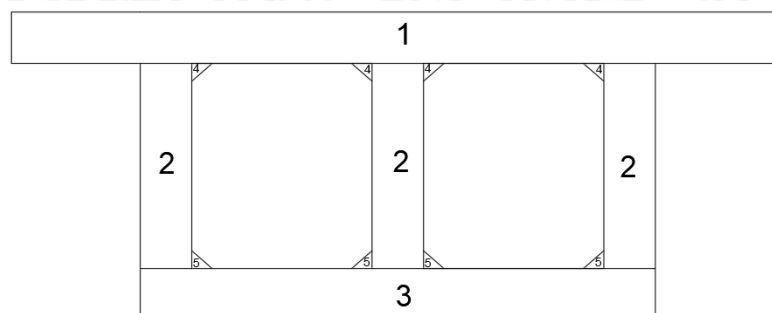


**Gambar 5.4 Properties *Box Girder* Penampang Trapesium**



**Tabel 5.3 Properties Penampang Box Girder Trapesium**

No	Dimensi		Jumlah	Luas	Jarak	Statis	Momen	Momen
	Lebar	Tinggi		Tampang	Terhadap	Momen	Inersia	
	m	m		A	Alas	A x y	A x y <sup>2</sup>	
			m <sup>2</sup>	y	m	m <sup>3</sup>	m <sup>4</sup>	m <sup>4</sup>
1	1,5	0,3	2	0,9	3,150	2,84	8,93	0,00675
2	1,5	0,2	2	0,3	2,867	0,86	2,47	0,00067
3	6	0,5	1	3	3,050	9,15	27,91	0,06250
4	0,054	0,15	2	0,008	2,7	0,02	0,06	0,00001
5	0,53	0,15	2	0,159	2,725	0,43	1,18	0,00029
6	0,15	0,15	2	0,023	2,7	0,06	0,16	0,00003
7	0,5	2	2	2	1,5	3,00	4,50	0,66667
8	0,536	0,15	2	0,08	0,6	0,05	0,03	0,0001
9	0,477	0,15	2	0,143	0,575	0,08	0,05	0,00027
10	0,2	0,15	2	0,03	0,6	0,02	0,01	0,00004
11	0,178	0,5	2	0,089	0,25	0,02	0,01	0,00124
12	4	0,5	1	2	0,25	0,50	0,13	0,04167
13	0,5	2	1	1	1,5	1,50	2,25	0,33333
14	0,15	0,15	2	0,023	2,7	0,06	0,16	0,00003
15	0,15	0,15	2	0,023	0,6	0,01	0,01	0,00003
	TOTAL			9,777		18,606	47,846	1,114

**Gambar 5.5 Properties Box Girder Penampang Persegi**

**Tabel 5.4 Properties Penampang Box Girder Persegi**

No	Dimensi		Jumlah	Luas Tampang	Jarak Terhadap Alas	Statis Momen	Momen Inersia	Momen Inersia
	Lebar	Tinggi		A	y	A x y	A x y <sup>2</sup>	
	m	m		m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup>	m <sup>4</sup>	
1	9	0,5	1	4,5	3,05	13,73	41,86	0,094
2	0,5	2,3	3	3	0,25	0,75	0,19	0,063
3	6	0,5	1	3,45	1,65	5,69	9,39	0,507
4	0,15	0,15	4	0,045	2,700	0,12	0,33	0,0001
5	0,15	0,15	4	0,045	0,600	0,12	0,33	0,0001
TOTAL				10,95		20,316	51,786	0,663

Berikut ini merupakan contoh perhitungan pada penampang trapesium *box girder* prategang.

1. Tinggi *box girder* prategang = 3,3 m  
Luas penampang *box girder* ( $A_{bruto}$ ) = 9,777 m<sup>2</sup>

2. Letak titik berat *box girder* :

$$y_b = \frac{\Sigma A \cdot y}{\Sigma A}$$

$$= \frac{18,606}{9,777}$$

$$= 1,903 \text{ m}$$

$$y_a = H - y_b$$

$$= 3,3 - 1,903$$

$$= 1,397 \text{ m}$$

3. Momen inersia penampang terhadap alas *box* :

$$I_b = \Sigma(A \cdot y^2) + \Sigma I_0$$

$$= 47,846 + 1,114$$

$$= 48,960 \text{ m}^4$$

4. Momen inersia penampang terhadap titik berat *box* :

$$I_x = I_b - A \cdot y_b^2$$

$$= 48,960 - 9,777 \cdot (1,903)^2$$

$$= 13,553 \text{ m}^4$$

6. Modulus penampang *box* bagian atas :

$$\begin{aligned} S_a &= \frac{I_x}{y_a} \\ &= \frac{13,553}{1,397} \\ &= 9,701 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

7. Modulus penampang *box* bagian bawah :

$$\begin{aligned} S_b &= \frac{I_x}{y_b} \\ &= \frac{13,553}{1,903} \\ &= 7,122 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

8. Radius girasi :

$$\begin{aligned} r^2 &= \frac{I_x}{A_c} \\ &= \frac{13,553}{9,777} \\ &= 1,386 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

9. Batas *kern* atas :

$$\begin{aligned} K_a &= \frac{r^2}{y_b} \\ &= \frac{1,386}{1,903} \\ &= 0,728 \text{ m} \end{aligned}$$

10. Batas *kern* bawah :

$$\begin{aligned} K_b &= \frac{r^2}{y_a} \\ &= \frac{1,386}{1,397} \\ &= 0,992 \text{ m} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan properties penampang diperoleh nilai momen inersia, modulus penampang serta titik berat penampang. Adapun hasil rekapitulasi dari perhitungan penampang *box girder* dapat dilihat pada **Tabel 5.5** berikut.

**Tabel 5.5 Properties Penampang**

Rekapitulasi Properties Penampang					
Penampang		Trapesium		Persegi	
Letak titik berat	$ya$	1,397	m	1,460	m
	$yb$	1,903	m	1,840	m
Momen inersia terhadap alas	$Ib$	48,960	m <sup>4</sup>	52,449	m <sup>4</sup>
Momen inersia terhadap titik berat	$Ix$	13,553	m <sup>4</sup>	15,063	m <sup>4</sup>
Modulus penampang	$Sa$	9,701	m <sup>3</sup>	10,319	m <sup>3</sup>
	$Sb$	7,122	m <sup>3</sup>	8,185	m <sup>3</sup>
Radius girasi	$r2$	1,386	m <sup>2</sup>	1,364	m <sup>2</sup>
Batas kern	$Ka$	0,728	m	0,741	m
	$Kb$	0,992	m	0,935	m

### 5.2.3 Perhitungan Pembebanan Balok Prategang

Perhitungan pembebanan pada *box girder* prategang meliputi berat mati, beban lalu lintas, beban lingkungan dan beban gempa. Pembebanan pada girder mengacu pada SNI 1725:2016 Peraturan Pembebanan pada Jembatan. Adapun perhitungan pembebanan pada *box girder* adalah sebagai berikut.

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

Berat sendiri merupakan berat dari bagian jembatan dan elemen – elemen struktur jembatan lainnya menurut SNI 1725:2016 pasal 7.2. Sebagaimana yang dimaksud elemen struktural adalah berat bahan dan bagian jembatan ditambah dengan elemen nonstruktural yang dianggap tetap. Berdasarkan perhitungan properties penampang *girder* trapesium prategang diperoleh luas penampang ( $A$ ) = 9,777 m<sup>2</sup> dan berat jenis dari beton prategang ( $wc$ ) = 23,1 kN/m<sup>3</sup>.

$$\begin{aligned}
 \text{Berat sendiri } box (Q_{bs}) &= A \cdot wc \\
 &= 9,777 \cdot 23,1 \\
 &= 225,848 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Momen maksimum akibat berat mati sendiri di tengah bentang.

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum (M}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{8} \cdot Q_{\text{bs}} \cdot L^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot 225,848 \cdot 80^2 \\ &= 180678,784 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Gaya geser maksimum akibat berat mati sendiri di tumpuan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser maksimum (V}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{bs}} \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \cdot 225,848 \cdot 80 \\ &= 9033,939 \text{ kN} \end{aligned}$$

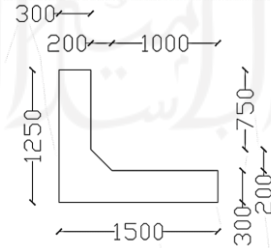
## 2. Berat Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan merupakan berat seluruh bahan yang membentuk suatu beban pada jembatan yang merupakan elemen nonstruktural, dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan (SNI 1725:2016 pasal 7.3). Dalam analisis *box girder* berat mati tambahan yang digunakan berupa trotoar, pagar jembatan, air hujan dan aspal.

### a. Berat mati tambahan trotoar dan pagar jembatan

Beton yang digunakan pada trotoar adalah beton bertulang dengan berat jenis ( $w'_c$ ) = 22 kN/m<sup>3</sup> dan pagar jembatan menggunakan material baja dengan berat jenis ( $w_{\text{baja}}$ ) = 78,5 kN/m<sup>3</sup>. Dimensi dari trotoar dan pagar jembatan dapat dilihat pada **Tabel 5.6** berikut.

**Tabel 5.6 Dimensi Trotoar dan Pagar**



	Lebar (b) (m)	Tinggi (h) (m)
Trotoar	1,3	0,2
Pagar	0,3	0,75

$$\begin{aligned}\text{Berat trotoar} &= (b \cdot h) \cdot w'c \\ &= (1,3 \cdot 0,2) 22 \\ &= 5,72 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat pagar} &= (b \cdot h) \cdot w_{\text{baja}} \\ &= (0,3 \cdot 0,75) 78,5 \\ &= 17,663 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

b. Berat mati tambahan air hujan dan aspal

Berat jenis yang digunakan untuk air hujan ( $w_{\text{air}} = 9,8 \text{ kN/m}^3$ ) dan berat jenis yang digunakan untuk aspal dan *overlay* ( $w_{\text{aspal}} = 22 \text{ kN/m}^3$ ).

**Tabel 5.7 Luasan Beban Mati Tambahan Air Hujan dan Aspal**

	Lebar (b) (m)	Tinggi (h) (m)
Aspal dan <i>overlay</i>	6	0,1
Air hujan	9	0,05

$$\begin{aligned}\text{Berat aspal} &= (b \cdot h) \cdot w_{\text{aspal}} \\ &= (6 \cdot 0,1) 22 \\ &= 13,2 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat aspal} &= (b \cdot h) \cdot w_{\text{air}} \\ &= (9 \cdot 0,05) 9,8 \\ &= 4,41 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Berat total beban tambahan} &= 5,72 + 17,663 + 13,2 + 4,41 \\ &= 40,993 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Momen maksimum akibat berat mati tambahan di tengah bentang.

$$\begin{aligned}\text{Momen maksimum (M}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{8} \cdot Q_{\text{MA}} \cdot L^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot 40,993 \cdot 80^2 \\ &= 32794 \text{ kNm}\end{aligned}$$

Gaya geser maksimum akibat berat mati tambahan di tumpuan.

$$\begin{aligned}\text{Gaya geser maksimum (V}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{MA}} \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \cdot 40,993 \cdot 80 \\ &= 1639,7 \text{ kN}\end{aligned}$$

### 3. Beban Pejalan Kaki (TP)

Intensitas pejalan kaki berdasarkan SNI 1725:2016 pasal 8.9 sebesar 5 kPa pada komponen trotoar yang memiliki lebar lebih dari 600 mm. Rencana trotoar pada *box girder* memiliki lebar 1500 mm.

$$\text{Lebar trotoar} = 1500 \text{ mm} = 1,5 \text{ m}$$

$$\text{Panjang bentang} = 80 \text{ meter}$$

$$\text{Intensitas pejalan kaki} = 5 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban pejalan kaki (Q}_{\text{TP}}) &= 5 \cdot 1,5 \\ &= 7,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Momen maksimum akibat berat mati tambahan di tengah bentang.

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum (M}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{8} \cdot Q_{\text{TP}} \cdot L^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot 7,5 \cdot 80^2 \\ &= 6000 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Gaya geser maksimum akibat berat mati tambahan di tumpuan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser maksimum (V}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{TP}} \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \cdot 7,5 \cdot 80 \\ &= 3,750 \text{ kN} \end{aligned}$$

### 4. Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” terdiri dari beban terbagi merata (BTR) yang digabungkan dengan beban garis terpusat (BGT). Berdasarkan SNI 1725:2016 pasal 8.3.1, besaran intensitas  $q$  kPa pada beban terbagi rata (BTR) dipengaruhi oleh panjang total bentang yang terbebani. Beban garis terpusat (BGT) dengan intensitas  $p$  kN/m ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas jembatan. Besar intensitas BGT adalah 49 kN/m. Adapun perhitungan beban garis terpusat (BGT) dan beban terbagi rata BTR adalah sebagai berikut.

#### a. Beban Terbagi Rata (BTR)

$$\text{Panjang jembatan (L)} = 80 \text{ meter} > 30 \text{ meter}$$

$$\text{Lebar lajur (B)} = 6 \text{ meter}$$

$$\begin{aligned} \text{Intensitas BTR (q)} &= 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \\ &= 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{80}\right) \\ &= 6,188 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban merata (Q}_{\text{TD}}) &= q \cdot B \\ &= 6,188 \cdot 6 \\ &= 37,125 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b. **Beban Garis Terpusat (BGT)**

$$\text{Faktor beban dinamis untuk } L > 50 \text{ meter (DLA)} = 0,525 - 0,0025 L.$$

$$\begin{aligned} \text{DLA} &= 0,525 - 0,0025 \cdot 80 \\ &= 0,325 \end{aligned}$$

$$\text{Intensitas BGT (p)} = 49 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban garis (P}_{\text{TD}}) &= (1 + \text{DLA}) \cdot p \cdot B \\ &= (1 + 0,325) \cdot 49 \cdot 6 \\ &= 389,55 \text{ kN} \end{aligned}$$

Momen maksimum akibat beban “D” di tengah bentang.

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum (M}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{8} \cdot Q_{\text{TD}} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P_{\text{TD}} \cdot L \\ &= \frac{1}{8} \cdot 37,125 \cdot 80^2 + \frac{1}{4} \cdot 389,55 \cdot 80 \\ &= 37491 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Gaya geser maksimum akibat beban “D” di tumpuan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser maksimum (V}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{TD}} \cdot L + \frac{1}{2} \cdot P_{\text{TD}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot 37,125 \cdot 80 + \frac{1}{2} \cdot 389,55 \\ &= 1679,775 \text{ kN} \end{aligned}$$

5. **Gaya Rem (TB)**

Gaya rem harus ditempatkan disemua lajur rencana yang dimuati dan berisi lalu lintas dengan arah yang sama. Menurut SNI 1725:2016 pasal 8.7, gaya rem diasumsikan bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm diatas permukaan jalan pada masing – masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan. Berdasarkan SNI 175:2016, gaya rem diambil nilai yang terbesar dari :



- a. 25% dari berat gandar truk desain
- Berat gandar desain = 500 kN
- Gaya rem (25% berat gandar) = 25% . 500
- = 125 kN
- b. 5% dari berat gandar truk desain + BTR.
- Beban terbagi rata (BTR) = 37,125 kN
- Berat gandar desain = 500 kN
- Gaya rem (5% gandar + BTR) = 5% . 500 + (80 . 37,125)
- = 173,5 kN

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, digunakan gaya rem = 173,5 kN.

Momen maksimum akibat gaya rem di tengah bentang.

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum (M}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{4} \cdot P_{\text{TB}} \cdot L \\ &= \frac{1}{4} \cdot 173,5 \cdot 80 \\ &= 3470 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Gaya geser maksimum akibat gaya rem di tumpuan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser maksimum (V}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{2} \cdot P_{\text{TB}} \\ &= \frac{1}{2} \cdot 173,5 \\ &= 86,75 \text{ kN} \end{aligned}$$

#### 6. Beban Angin Kendaraan (EW)

Jembatan harus direncanakan dapat memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan. Tekanan angin pada kendaraan dalam SNI 1725:2016 pasal 9.6.1.2 diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 1800 mm diatas permukaan jalan. Berikut merupakan beban yang bekerja pada tiap gandar.

- a. Gandar depan
- Jarak gandar = 4 meter
- $T_{\text{EW1}} = \text{EW} \cdot L_{\text{T1}}$
- = 1,46 . 4
- = 5,84 kNm

## b. Gandar tengah

$$\text{Jarak gandar} = 4,5 \text{ meter}$$

$$T_{EW2} = EW \cdot L_{T2}$$

$$= 1,46 \cdot 4,5$$

$$= 6,57 \text{ kNm}$$

## c. Gandar belakang

$$\text{Jarak gandar} = 4 \text{ meter}$$

$$T_{EW3} = EW \cdot L_{T3}$$

$$= 1,46 \cdot 4$$

$$= 5,84 \text{ kNm}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tekanan angin pada setiap gandar, nilai tekanan angin paling besar yang terdapat pada gandar bagian tengah gandar yaitu 6,57 kNm. Maka besaran tekanan angin dari gandar bagian tengah digunakan dalam analisis *box girder*.

Momen maksimum akibat beban angin kendaraan di tengah bentang.

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum (M}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{8} \cdot Q_{EW} \cdot L^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot 6,57 \cdot 80^2 \\ &= 5256 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Gaya geser maksimum akibat beban angin kendaraan di tumpuan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser maksimum (V}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{2} \cdot Q_{EW} \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \cdot 6,57 \cdot 80 \\ &= 262,8 \text{ kN} \end{aligned}$$

## 7. Beban Gempa (EQ)

Berdasarkan SNI 2833:2016 pasal 5.11 *hold down service*, gaya vertikal jembatan direncanakan sebesar 10% dari beban permanen. Adapun beban permanen yang digunakan yaitu berat sendiri *box girder*, berat mati tambahan *tortoar* dan pagar jembatan, serta berat mati tambahan lapis aspal dan *overlay*.

$$\begin{aligned} \text{Total beban permanen} &= MS + MA \text{ trotoar} + MA \text{ aspal} \\ &= 227,447 + 23,383 + 13.2 \\ &= 264,03 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban gempa (EQ)} &= 10\% \text{ beban permanen} \\ &= 10\% \cdot 264,03 \\ &= 26,403 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Momen maksimum akibat beban gempa di tengah bentang.

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum (M}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{8} \cdot Q_{\text{EQ}} \cdot L^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot 26,403 \cdot 80^2 \\ &= 21122,378 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Gaya geser maksimum akibat beban gempa di tumpuan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser maksimum (V}_{\text{maks}}) &= \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{EQ}} \cdot L \\ &= \frac{1}{2} \cdot 26,403 \cdot 80 \\ &= 1056,119 \text{ kN} \end{aligned}$$

Adapun rekapitulasi beban, momen dan gaya geser pada balok penampang trapesium dan penampang persegi dapat dilihat pada **Tabel 5.8** dan **Tabel 5.9** berikut.

**Tabel 5.8 Rekapitulasi Beban, Momen dan Gaya Geser Box Trapesium**

No	Beban	Kode	Q (kN/m)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)
1	Berat mati sendiri	MS	225,848		9033,939	180678,784
2	Berat mati tambahan	MA	40,993		1639,7	32794
3	Beban pejalan kaki	TP	15		600	12000
4	Beban lajur "D"	TD	37,125	388,08	1679,04	37461,6
5	Beban rem	TB	173,5		86,75	3470
6	Beban angin	EW	6,57		262,8	5256
7	Beban gempa	EQ	26,684		1067,364	21347,278

**Tabel 5.9 Rekapitulasi Beban, Momen dan Gaya Geser Box Persegi**

No	Beban	Kode	Q (kN/m)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)
1	Berat mati sendiri	MS	255,024		10200,96	204019,2
2	Berat mati tambahan	MA	40,993		1639,7	32794
3	Beban pejalan kaki	TP	15		600	12000
4	Beban lajur "D"	TD	37,125	388,08	1679,04	37461,6
5	Beban rem	TB	173,5		86,75	3470
6	Beban angin	EW	6,57		262,8	5256
7	Beban gempa	EQ	29,602		1184,066	23681,32

#### 5.2.4 Perhitungan Gaya dan Tendon Prategang

Jembatan Grembyangan didesain dengan menggunakan metode *post tension* (pascatarik). Pola tegangan umumnya ditinjau atau diperiksa pada dua keadaan yang berbeda. Tegangan izin beton prategang ditinjau dalam keadaan transfer dan keadaan layan (*service*). Pembatasan tegangan izin beton prategang pada kedua kondisi tersebut, yaitu :

Mutu beton prategang ( $f'_c$ ) = 50 MPa

Transfer gaya prategang dianggap baru mencapai 80%, maka :

$$\begin{aligned} \text{Mutu beton saat transfer } (f'_{ci}) &= 80\% \cdot f'_c \\ &= 80\% \cdot 50 \\ &= 40 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan izin beton saat transfer

$$\begin{aligned} \text{Serat tarik } (f_{ti}) &= 0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} \\ &= 0,25 \cdot \sqrt{40} \\ &= 1,581 \text{ MPa} = 1581 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Serat tekan } (f_{ci}) &= 0,60 \cdot f'_{ci} \\ &= 0,60 \cdot 40 \\ &= 24 \text{ MPa} = 24000 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Tegangan izin beton pada saat layan

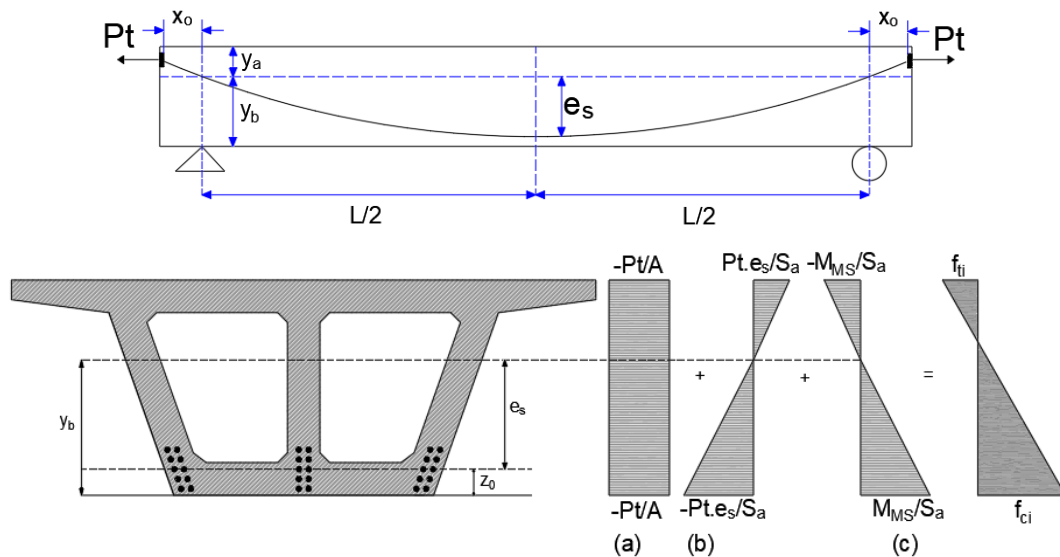
$$\begin{aligned}\text{Serat tarik } (f_{ti}) &= 0,5 \cdot \sqrt{f'_c} \\ &= 0,5 \cdot \sqrt{50} \\ &= 3,536 \text{ MPa} = 3536 \text{ kPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Serat tekan } (f_{ci}) &= 0,40 \cdot f'_c \\ &= 0,40 \cdot 50 \\ &= 22,5 \text{ MPa} = 22500 \text{ kPa}\end{aligned}$$

#### 1. Perhitungan Gaya Prategang Awal

Untuk perencanaan komponen struktur jembatan yang mengutamakan suatu pembatasan tegangan kerja, seperti untuk perencanaan terhadap lentur dari komponen-komponen struktur beton prategang, atau struktur beton lainnya yang dianggap sesuai kebutuhan perilaku deformasinya, atau sebagai cara perhitungan alternatif, boleh digunakan cara Perencanaan berdasarkan Batas Layan (PBL), yang pada umumnya dibatasi oleh suatu nilai tegangan ijin dari material struktur, dan/atau suatu nilai deformasi ijin, atau perilaku lainnya yang diijinkan pada komponen struktur bersangkutan. Adapun Batasan tegangan pada saat transfer sebagai berikut.

- |    |  |   |
|----|--|---|
| a. | Serat tekan ( $f_{ci}$ )                                   | = 24000 kPa                                   |
| b. | Serat tarik ( $f_{ti}$ )                                   | = 1518 kPa                                    |
| c. | Momen maksimum akibat berat sendiri                        | = 180678,7844 kNm                             |
| d. | Luas penampang <i>box girder</i>                           | = 9,777 m <sup>2</sup>                        |
| e. | Modulus penampang bagian atas ( $S_a$ )                    | = 9,701 m <sup>3</sup>                        |
| f. | Modulus penampang bagian bawah ( $S_b$ )                   | = 7,122 m <sup>3</sup>                        |
| g. | Letak titik berat <i>box</i> terhadap sisi bawah ( $y_b$ ) | = 1,903 m                                     |
| h. | Jarak pusat tendon terhadap sisi bawah ( $z_0$ )           | = 0,502 m                                     |
| i. | Eksentrisitas tendon ( $e_s$ )                             | = $y_b - z_0$<br>= 1,903 – 0,502<br>= 1,401 m |



**Gambar 5.6 Gaya Prategang Awal dan Eksentrisitas Tendon di Tengah**

Gaya prategang awal ditinjau pada kondisi transfer yaitu pemeriksaan tegangan saat pemberian gaya prategang. Besar gaya prategang awal dihitung menggunakan persamaan tegangan pada saat kondisi transfer dengan terlebih dahulu menetapkan jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah box girder untuk mendapatkan nilai eksentrisitas.

Gambar 5.6(a) nilai  $\frac{P}{A}$  menunjukkan gaya prategang bekerja secara merata pada seluruh bagian penampang balok prategang., dimana  $A$  merupakan luas penampang balok. Gambar 5.6(b) tegangan terjadi akibat adanya eksentrisitas yang mengakibatkan penampang balok mengalami lendutan keatas (*chamber*). Pada kondisi tersebut, serat bagian atas mengalami tegangan tarik dan serat bagian bawah mengalami tegangan tekan. Gambar 5.6(c) menunjukkan tegangan akibat adanya beban luar yang bekerja  $\frac{M}{S_x}$  pada seluruh penampang, sehingga serat bagian atas mengalami tegangan tekan dan serat bagian bawah mengalami tegangan tarik. Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung tegangan saat kondisi transfer adalah sebagai berikut.

$$f_x = -\frac{P_t}{A} - \frac{M_P}{S_x} + \frac{M_{DL}}{S_x} \quad , \text{ dengan } M_P = P_t \cdot e_s$$

a. Tegangan diserat atas

$$f_a = -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{S_a} + \frac{M_{DL}}{S_a}$$

$$1581 = -\frac{P_t}{9,777} - \frac{P_t \cdot 1,401}{9,701} + \frac{180678,784}{9,701}$$

$$P_t = 479571,209 \text{ kN}$$

b. Tegangan diserat bawah

$$f_b = -\frac{P_t}{A} - \frac{P_t \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{DL}}{S_b}$$

$$24000 = -\frac{P_t}{9,777} - \frac{P_t \cdot 1,401}{7,122} + \frac{180678,784}{7,122}$$

$$P_t = 165115,092 \text{ kN}$$

Gaya prategang awal yang digunakan adalah  $P_0 = 165115,092 \text{ kN}$ .

Kehilangan gaya prategang (LOF) paskatarik diperkirakan sebesar 20%

$$\begin{aligned} \text{Rasio kehilangan prategang (R)} &= 1 - \text{LOF} \\ &= 1 - 20\% \\ &= 80\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gaya prategang efektif (} P_{eff} \text{)} &= R \cdot P_0 \\ &= 80\% \cdot 165115,092 \\ &= 132092,074 \text{ kN} \end{aligned}$$

**Tabel 5.10 Rekapitulasi Gaya Prategang Awal dan Efektif**

Rekapitulasi	Kode	Trapeسيوم	Persegi
Tegangan izin tekan	$f_{ti}$	24	24
Tegangan izin tarik	$f_{ci}$	1,5811	1,5811
Momen maksimum berat sendiri	$M_{MS}$	180678,784	204019,2
Luas penampang <i>box</i>	A	9,777	11,040
Modulus penampang atas	$S_a$	9,701	10,319
Modulus penampang bawah	$S_b$	7,122	8,185
Titik berat <i>box</i> dari bawah	$y_b$	1,903	1,840
Jarak pusat tendon dari bawah	$z_0$	0,502	0,502
Eksentrisitas tendon	$e_s$	1,401	1,338
Gaya prategang awal	$P_0$	165115,092	192565,719
<i>Loss of Prestress</i>	<i>LOF</i>	20%	20%
Gaya prategang efektif	$P_{eff}$	132092,074	154052,575

#### 4. Daerah Aman Tendon Prategang

Daerah aman tendon prategang direncanakan pada tinjauan bagian ujung, tengah dan seperempat bentang balok prategang.

##### a. Momen – momen pada balok

###### 1) Momen akibat berat sendiri balok

Berat sendiri balok ( $Q_{bs}$ ) = 225,848 kN/m

Momen di tengah bentang :

$$\begin{aligned} M_{BS} &= \frac{1}{8} \cdot Q_{bs} \cdot L^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot 225,848 \cdot 80^2 \\ &= 180678,784 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Momen diseperempat bentang :

$$\begin{aligned} M_{BS} &= \frac{3}{32} \cdot Q_{bs} \cdot L^2 \\ &= \frac{3}{32} \cdot 225,848 \cdot 80^2 \\ &= 135509,088 \text{ kNm} \end{aligned}$$

###### 2) Momen akibat berat mati tambahan

Berat mati tambahan ( $Q_{MA}$ ) = 40,993 kN/m

Momen di tengah bentang :

$$\begin{aligned} M_{BS} &= \frac{1}{8} \cdot Q_{MA} \cdot L^2 \\ &= \frac{1}{8} \cdot 40,993 \cdot 80^2 \\ &= 32794 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Momen diseperempat bentang :

$$\begin{aligned} M_{BS} &= \frac{3}{32} \cdot Q_{MA} \cdot L^2 \\ &= \frac{3}{32} \cdot 40,993 \cdot 80^2 \\ &= 24595,5 \text{ kNm} \end{aligned}$$



## 3) Momen akibat beban lalu lintas

Berat mati tambahan ( $Q_{TD}$ ) = 37,125 kN/m

Momen di tengah bentang :

$$\begin{aligned} M_{BS} &= \frac{1}{8} \cdot Q_{TD} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P_{TD} \cdot L \\ &= \frac{1}{8} \cdot 37,125 \cdot 80^2 + \frac{1}{4} \cdot 388,05 \cdot L \\ &= 37461,6 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Momen disepertempat bentang :

$$\begin{aligned} M_{BS} &= \frac{3}{32} \cdot Q_{TD} \cdot L^2 + \frac{1}{4} \cdot P_{TD} \cdot L \\ &= \frac{3}{32} \cdot 37,125 \cdot 80^2 + \frac{1}{4} \cdot 388,05 \cdot 80 \\ &= 30036,6 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Rekapitulasi hasil perhitungan momen dapat dilihat pada **Tabel 5.11** berikut.

**Tabel 5.11 Rekapitulasi Perhitungan Momen**

Beban	di tengah	1/4 bentang	ujung
Penampang Trapesium			
Beban box girder ( $M_{BS}$ )	180678,784	135509,088	0
Beban mati ( $M_{MA}$ )	32794	24595,5	0
Beban hidup ( $M_{TD}$ )	37461,6	30036,6	0
$M_0 = M_{BS} + 50\% M_{MA}$	197075,784	147806,838	0
$M_T = M_{BS} + M_{MA} + M_{TD}$	250934,384	190141,188	0
Penampang Persegi			
Beban box girder ( $M_{BS}$ )	204019,200	151767	0
Beban mati ( $M_{MA}$ )	32794	24595,5	0
Beban hidup ( $M_{TD}$ )	37461,6	30036,6	0
$M_0 = M_{BS} + 50\% M_{MA}$	218753	164064,75	0
$M_T = M_{BS} + M_{MA} + M_{TD}$	272611,6	206399,1	0

## b. Batas Bawah Tendon

Momen beban mati ( $M_0$ ) tengah bentang pada penampang trapesium saat transfer sebesar 197075,784 kNm. Apabila diijinkan terjadi tegangan tarik pada beton saat kondisi transfer, maka terjadi pelebaran pada daerah tendon.

- 1) Batas bawah tendon pada bagian tengah bentang

$$\begin{aligned}
 a_{min} &= \frac{M_0}{P_0} \\
 &= \frac{197075,784}{165115,092} \\
 &= 1,194 \text{ m}
 \end{aligned}$$

- 2) Jika saat kondisi transfer diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton, maka terdapat penambahan besar lebar sekitar tendon.

$$\begin{aligned}
 e_b &= a_{min} + K_b \\
 &= 1,194 + 0,992 \\
 &= 2,186 \text{ m} \\
 e_b' &= \frac{f_{ti} \cdot A_c \cdot K_b}{P_0} \\
 &= \frac{1581,139 \cdot 9,777 \cdot 0,992}{165115,092} \\
 &= 0,093 \text{ m} \\
 e_{b1} &= e_b + e_b' \\
 &= 2,186 + 0,093 \\
 &= 2,279 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan batas bawah tendon penampang trapesium dan persegi dapat dilihat pada **Tabel 5.12** berikut.

**Tabel 5.12 Rekapitulasi Batas Bawah Tendon**

Penampang Trapesium	Tidak Terjadi Tarik		Terjadi Tarik	
	$a_{min}$	$e_b$	$e_b'$	$e_{b1}$
Tengah bentang	1,194	2,186	0,093	2,279
Seperempat bentang	0,895	1,887	2,279	4,166
Ujung	0,000	0,992	0,000	0,992
Penampang Persegi	Tidak Terjadi Tarik		Terjadi Tarik	
	$a_{min}$	$e_b$	$e_b'$	$e_{b1}$
Tengah bentang	1,145	2,079	0,085	2,164
Seperempat bentang	0,858	1,793	2,164	3,957
Ujung	0,000	0,935	0,000	0,935

## c. Batas Atas Tendon

$$M_T = 272611,600 \text{ kNm}$$

## 1) Batas atas tendon pada bagian tengah bentang

$$\begin{aligned} a_{max} &= \frac{M_T}{P_e} \\ &= \frac{250934,384}{132092,074} \\ &= 1,900 \text{ m} \end{aligned}$$

## 2) Jika saat kondisi layan diperkenankan terjadi tegangan tarik pada beton, maka terdapat penambahan besar lebar sekitar tendon.

$$\begin{aligned} e_t &= a_{max} - K_a \\ &= 1,900 - 0,728 \\ &= 1,171 \text{ m} \\ e_t' &= \frac{f_{ts} \cdot A_c \cdot K_a}{P_e} \\ &= \frac{3535,534 \cdot 9,777 \cdot 0,728}{132092,074} \\ &= 0,191 \text{ m} \\ e_{t1} &= e_t - e_t' \\ &= 1,171 - 0,191 \\ &= 1,362 \text{ m} \end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan batas bawah tendon penampang trapesium dan persegi dapat dilihat pada **Tabel 5.13** berikut.

**Tabel 5.13 Rekapitulasi Batas Atas Tendon**

Penampang Trapesium	Tidak Terjadi Tarik		Terjadi Tarik	
	$a_{max}$	$e_t$	$e_t'$	$e_{t1}$
Tengah bentang	1,900	1,171	0,191	1,362
Seperempat bentang	1,439	0,711	0,191	0,902
Ujung	0,000	0,000	0,191	0,000
Penampang Persegi	Tidak Terjadi Tarik		Terjadi Tarik	
	$a_{max}$	$e_t$	$e_t'$	$e_{t1}$
Tengah bentang	1,780	1,039	0,188	1,227
Seperempat bentang	1,348	0,606	0,188	0,794
Ujung	0,000	0,000	0,188	0,000

Asumsi eksentrisitas penampang trapesium pada tengah bentang aktual :

$$e_t = 1,171 \text{ m} < e_s = 1,401 \text{ m} < e_b = 2,186 \text{ m} \longrightarrow \text{asumsi OK}$$

Asumsi eksentrisitas penampang persegi pada tengah bentang aktual :

$$e_t = 1,039 \text{ m} < e_s = 1,338 \text{ m} < e_b = 2,079 \text{ m} \longrightarrow \text{asumsi OK}$$

#### 5. Perhitungan Jumlah Tendon Prategang

Tendon baja prategang menggunakan standar ASTM A416 merk VSL. Dalam satu tendon terdiri dari beberapa untaian kabel baja prategang yang disatukan. Adapun spesifikasi kabel baja prategang untuk penampang trapesium dapat dilihat pada **Tabel 5.14** berikut.

**Tabel 5.14 Spesifikasi Baja Prategang Penampang Trapesium**

Jenis <i>strands</i>	<i>Uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270</i>		
Tegangan leleh <i>strands</i>	$f_{py}$	1676	MPa
Kuat tarik <i>strands</i>	$f_{pu}$	1860	MPa
Diameter nominal <i>strands</i>	d	15,24	mm
Luas tampang nominal satu <i>strands</i>	$A_{st}$	182,41	mm <sup>2</sup>
Beban putus minimal satu <i>strands</i>	$P_{bs}$	260,65	kN
Jumlah kawat untaian ( <i>strands cable</i> )	n	28	kawat tiap untaian
Diameter selubung ideal		80,64	mm
Luas tampang <i>strands</i>		5107,61	mm <sup>2</sup>
Beban putus satu tendon	$P_{bl}$	7298,20	kN
Modulus elastis <i>strands</i>	$E_s$	195000	MPa

(Sumber : Tabel VSL *Strand Post – Tensioning System*)

Adapun perhitungan jumlah tendon penampang trapesium adalah sebagai berikut.

a. Gaya prategang awal ( $P_t$ ) = 165115,092 kN

b. Kuat tarik *strands* ( $f_{pu}$ ) = 1860 MPa

c. Tegangan leleh *strands* ( $f_{py}$ ) = 1676 MPa

d. Tegangan izin tendon sesaat setelah transfer

$$\begin{aligned} f_{pi} &= 0,74 f_{pu} \\ &= 0,74 \cdot 1860 \\ &= 1376,4 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{pi} &= 0,82 f_{pu} \\
 &= 0,82 \cdot 1860 \\
 &= 1374,32 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

e. Tegangan izin yang digunakan sesaat setelah transfer = 1374,32 MPa

f. Luas area baja prategang yang diperlukan,

$$\begin{aligned}
 A_s &= \frac{P_t}{f_{pi}} \\
 &= \frac{165115,092}{1374,32} \\
 &= 120143,119 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

g. Beban putus minimal 1 tendon,

$$\begin{aligned}
 P_{b1} &= P_{bs} \cdot n \\
 &= 260,65 \cdot 32 \\
 &= 8340,8 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

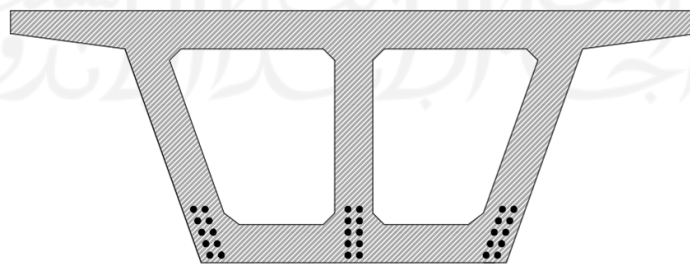
h. Jumlah tendon yang diperlukan,

$$\begin{aligned}
 n_t &= \frac{P_t}{0,8 P_{b1}} \\
 &= \frac{165115,092}{0,8 \cdot 8340,8} \\
 &= 24,74 \text{ tendon}
 \end{aligned}$$

i. Jumlah tendon aktual

$$n_t = 30 \text{ tendon}$$

Tendon berjumlah 30 pada *box girder* dengan susunan 3 baris. Tiap baris berjumlah 6 tendon seperti pada **Gambar 5.7** sebagai berikut.



**Gambar 5.7 Susunan Layout Tendon di Tengah Bentang**

Digunakan jumlah strands dengan susunan seperti pada **Tabel 5.15** berikut.

Tabel 5.15 Jumlah *Strands* Setiap Baris

Baris	Jumlah Tendon		Jumlah <i>strands</i> /tendon			
n <sub>s1</sub>	6	tendon	32	<i>strands</i> /tendon	192	
n <sub>s2</sub>	6	tendon	32	<i>strands</i> /tendon	192	
n <sub>s3</sub>	6	tendon	32	<i>strands</i> /tendon	192	
n <sub>s4</sub>	6	tendon	32	<i>strands</i> /tendon	192	
n <sub>s5</sub>	6	tendon	32	<i>strands</i> /tendon	192	
n <sub>t</sub>	30	tendon		<i>strands</i> /tendon	960	<i>strands</i>

j. Luas aktual area baja prategang yang digunakan dalam desain

$$\begin{aligned}
 A_{ps} &= n_s \cdot A_{st} \\
 &= 960 \cdot 182,41 \\
 &= 175118,105 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

k. Beban satu tendon

$$\begin{aligned}
 P_{1 \text{ tendon}} &= \frac{P_t}{n_t} \\
 &= \frac{165115,092}{30} \\
 &= 5503,836 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 P_0 &= \frac{P_t}{0,85 n_s P_{bs}} \\
 &= \frac{165115,092}{0,85 \cdot 960 \cdot 260,65} \\
 &= 77,6 \% < 80 \% \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

m. Gaya prategang aktual yang terjadi akibat *jacking*.

$$\begin{aligned}
 P_j &= P_0 \cdot n_t \cdot P_{b1} \\
 &= 0,776 \cdot 30 \cdot 5503,836 \\
 &= 194253,049 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

n. Tegangan baja prategang saat *jacking*

$$\begin{aligned}
 f_{pj} &= \frac{P_j}{A_{ps}} \\
 &= \frac{194253,049}{175118,105} \\
 &= 1109,269 \text{ MPa} < 0,8 f_{pu} = 1676 \text{ MPa} \\
 & < 0,94 f_{py} = 1860 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Pada penampang persegi, tendon baja prategang juga menggunakan standar ASTM A416 merk VSL. Adapun spesifikasi tendon baja prategang untuk penampang persegi dapat dilihat pada **Tabel 5.16** berikut.

**Tabel 5.16 Spesifikasi Baja Prategang Penampang Persegi**

Jenis <i>strands</i>	<i>Uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270</i>		
Tegangan leleh <i>strands</i>	$f_{py}$	1676	MPa
Kuat tarik <i>strands</i>	$f_{pu}$	1860	MPa
Diameter nominal <i>strands</i>	d	15,24	mm
Luas tampang nominal satu <i>strands</i>	$A_{st}$	182,41	mm <sup>2</sup>
Beban putus minimal satu <i>strands</i>	$P_{bs}$	260,65	kN
Jumlah kawat untaian ( <i>strands cable</i> )	n	40	kawat tiap untaian
Diameter selubung ideal		96,39	mm
Luas tampang <i>strands</i>		7296,59	mm <sup>2</sup>
Beban putus satu tendon	$P_{bl}$	10426,00	kN
Modulus elastis <i>strands</i>	$E_s$	195000	MPa

(Sumber : Tabel VSL *Strand Post – Tensioning System*)

Adapun perhitungan jumlah tendon penampang persegi adalah sebagai berikut.

- a. Gaya prategang awal ( $P_t$ ) = 192565,719 kN
- b. Kuat tarik *strands* ( $f_{pu}$ ) = 1860 MPa
- c. Tegangan leleh *strands* ( $f_{py}$ ) = 1676 MPa
- d. Tegangan izin tendon sesaat setelah transfer
 
$$f_{pi} = 0,74 f_{pu}$$

$$= 0,74 \cdot 1860$$

$$= 1376,4 \text{ MPa}$$

$$f_{pi} = 0,82 f_{pu}$$

$$= 0,82 \cdot 1860$$

$$= 1374,32 \text{ MPa}$$
- e. Tegangan izin yang digunakan sesaat setelah transfer = 1374,32 MPa
- f. Luas area baja prategang yang diperlukan,
 
$$A_s = \frac{P_t}{f_{pi}}$$

$$= \frac{192565,719}{1374,32}$$

$$= 140117,09 \text{ mm}^2$$

g. Beban putus minimal 1 tendon,

$$\begin{aligned} P_{b1} &= P_{bs} \cdot n \\ &= 260,65 \cdot 40 \\ &= 10426 \text{ kN} \end{aligned}$$

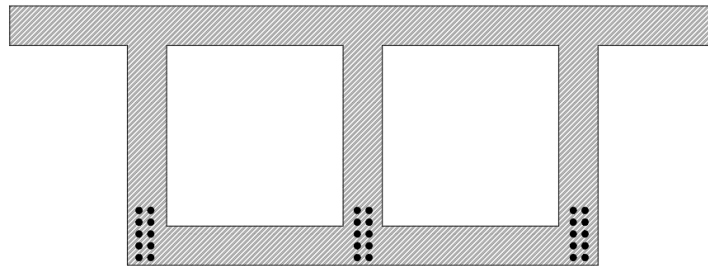
h. Jumlah tendon yang diperlukan,

$$\begin{aligned} n_t &= \frac{P_t}{0,8 P_{b1}} \\ &= \frac{192565,719}{0,8 \cdot 102426} \\ &= 23,08 \text{ tendon} \end{aligned}$$

i. Jumlah tendon aktual

$$n_t = 30 \text{ tendon}$$

Tendon berjumlah 30 pada *box girder* dengan susunan 3 baris. Tiap baris berjumlah 6 tendon seperti pada **Gambar 5.8** sebagai berikut.



**Gambar 5.8 Susunan Layout Tendon di Tengah Bentang**

Jumlah tendon dan *strands* yang akan digunakan pada penampang persegi dapat pada **Tabel 5.17** berikut.

**Tabel 5.17 Jumlah Strands Setiap Baris**

Baris	Jumlah Tendon		Jumlah <i>strands</i> /tendon			
$n_{s1}$	6	tendon	40	<i>strands</i> /tendon	240	
$n_{s2}$	6	tendon	40	<i>strands</i> /tendon	240	
$n_{s3}$	6	tendon	40	<i>strands</i> /tendon	240	
$n_{s4}$	6	tendon	40	<i>strands</i> /tendon	240	
$n_{s5}$	6	tendon	40	<i>strands</i> /tendon	240	
$n_t$	30	tendon		<i>strands</i> /tendon	1050	<i>strands</i>



j. Luas aktual area baja prategang yang digunakan dalam desain

$$\begin{aligned} A_{ps} &= n_s \cdot A_{st} \\ &= 1200 \cdot 182,41 \\ &= 218897,631 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

k. Beban satu tendon

$$\begin{aligned} P_{1 \text{ tendon}} &= \frac{P_t}{n_t} \\ &= \frac{192565,719}{30} \\ &= 6418,857 \text{ kN} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{P_t}{0,85 n_s P_{bs}} \\ &= \frac{192565,719}{0,85 \cdot 1200 \cdot 260,65} \\ &= 72,4 \% < 80 \% \text{ (OK)} \end{aligned}$$

m. Gaya prategang aktual yang terjadi akibat *jacking*.

$$\begin{aligned} P_j &= P_0 \cdot n_t \cdot P_{b1} \\ &= 0,724 \cdot 30 \cdot 10426 \\ &= 226547,905 \text{ kN} \end{aligned}$$

n. Tegangan baja prategang saat *jacking*

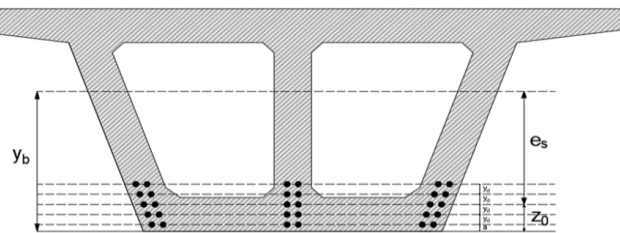
$$\begin{aligned} f_{pi} &= \frac{P_j}{A_{ps}} \\ &= \frac{226547,905}{218897,631} \\ &= 1034,949 \text{ MPa} < 0,8 f_{pu} = 1676 \text{ MPa} \\ & < 0,94 f_{py} = 1860 \text{ MPa} \end{aligned}$$

## 2. *Layout* Tendon Prategang

Peninjauan untuk perencanaan tata letak tendon dilakukan pada bagian ujung bentang dan tengah bentang. Berikut merupakan perhitungan *layout* tendon prategang untuk penampang trapesium.

a. Bagian Tengah Bentang Penampang Trapesium

Susunan (*layout*) tendon prategang pada bagian tengah bentang dapat dilihat pada **Gambar 5.9** berikut ini.



**Gambar 5.9** *Layout* Tendon di Tengah Bentang Penampang Trapesium

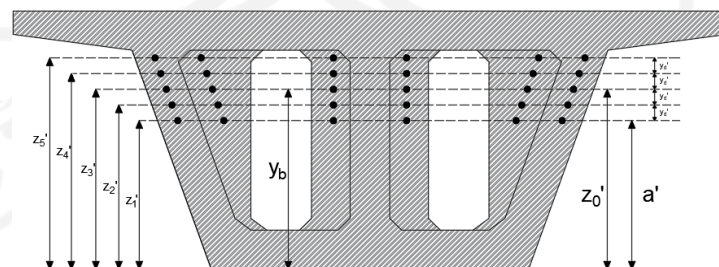
Jarak dari alas balok girder ke as tendon baris 1 ( $a$ ) = 0,1 m  
 Jarak dari alas balok girder ke titik berat tendon ( $z_0$ ) = 0,502 m  
 Jarak vertikal dari as ke as tendon ( $y_d$ ) =  $\frac{(z_0 - a)}{2}$   
 =  $\frac{(0,502 - 0,1)}{2}$   
 = 0,20 m

Jarak tiap baris tendon terhadap alas,

Baris 1 :  $Z_1 = a + 4 \cdot y_d = 0,1 + 4 \cdot 0,2 = 0,90$  m  
 Baris 2 :  $Z_2 = a + 3 \cdot y_d = 0,1 + 3 \cdot 0,20 = 0,70$  m  
 Baris 3 :  $Z_3 = a + 2 \cdot y_d = 0,1 + 2 \cdot 0,20 = 0,50$  m  
 Baris 4 :  $Z_4 = a + y_d = 0,1 + 0,20 = 0,30$  m  
 Baris 5 :  $Z_5 = a = 0,20 = 0,20$  m

b. Bagian Ujung Bentang Penampang Trapesium

Susunan (*layout*) tendon prategang pada bagian ujung bentang dapat dilihat pada **Gambar 5.10** berikut ini.



**Gambar 5.10** *Layout* Tendon di Ujung Bentang Penampang Trapesium

Jarak antar tendon ( $y_d'$ ) = 0,46 m  
 Jarak dari alas girder ke tendon bawah ( $a'$ ) =  $\frac{(y_b - y_d')}{2}$   
 =  $\frac{(1,903 - 0,46)}{2}$

$$= 0,722 \text{ m}$$

Jarak tiap baris tendon terhadap alas,

$$\text{Baris 1} : Z_1' = a' + 4 \cdot yd' = 0,722 + 4 \cdot 0,4 = 2,56 \text{ m}$$

$$\text{Baris 2} : Z_2' = a' + 3 \cdot yd' = 0,722 + 3 \cdot 0,4 = 2,10 \text{ m}$$

$$\text{Baris 3} : Z_3' = a' + 2 \cdot yd' = 0,722 + 2 \cdot 0,4 = 1,64 \text{ m}$$

$$\text{Baris 4} : Z_4' = a' + yd' = 0,722 + 0,4 = 1,18 \text{ m}$$

$$\text{Baris 5} : Z_5' = a' = 0,722 = 0,72 \text{ m}$$

c. Eksentrisitas Tiap Tendon Penampang Trapesium

$$\text{Baris 1} : f_1 = Z_1' - Z_1 = 2,56 - 0,90 = 1,66 \text{ m}$$

$$\text{Baris 2} : f_2 = Z_2' - Z_2 = 2,10 - 0,70 = 1,40 \text{ m}$$

$$\text{Baris 3} : f_3 = Z_3' - Z_3 = 1,64 - 0,50 = 1,14 \text{ m}$$

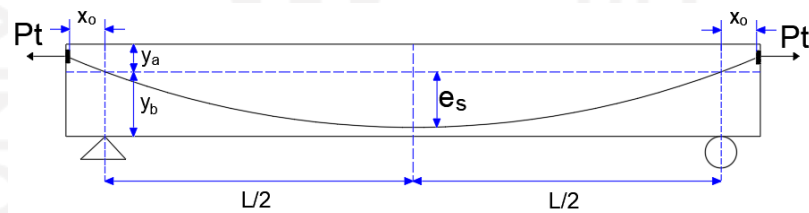
$$\text{Baris 4} : f_4 = Z_4' - Z_4 = 1,18 - 0,30 = 0,88 \text{ m}$$

$$\text{Baris 5} : f_5 = Z_5' - Z_5 = 0,72 - 0,10 = 0,62 \text{ m}$$

d. Lintasan Tendon Penampang Trapesium

Lintasan tendon dari ujung hingga tengah bentang dapat dilihat pada

**Gambar 5.10** berikut ini.



**Gambar 5.11** Lintasan Tendon Penampang Trapesium

$$\begin{aligned} \text{Eksentrisitas tendon } (e_s) &= \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5}{5} \\ &= \frac{1,66 + 1,40 + 1,14 + 0,88 + 0,62}{5} \\ &= 1,140 \text{ m} \end{aligned}$$

Persamaan lintasan tendon adalah  $4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot L - X$  dengan  $f = e_s$ .

$$\begin{aligned} \text{Lintasan inti tendon} &= 4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot L - X \\ &= 4 \cdot 1,05 \cdot \frac{1}{80^2} \cdot 80 - 1 \\ &= 0,052 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai eksentrisitas tendon berada pada jarak 1,05 meter dari bagian alas *box girder*. Hasil perhitungan lintasan tendon dapat dilihat pada **Tabel 5.18**.

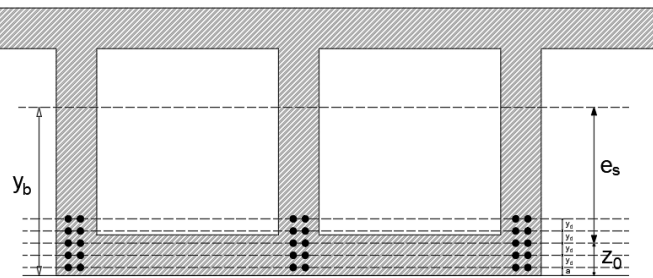
**Tabel 5.18 Perhitungan Lintasan Tendon Penampang Trapesium**

X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
-0,25	-0,014	21	0,882	42	1,137	63	0,763
1	0,056	22	0,909	43	1,133	64	0,729
2	0,111	23	0,934	44	1,128	65	0,694
3	0,165	24	0,957	45	1,122	66	0,658
4	0,217	25	0,979	46	1,114	67	0,620
5	0,267	26	1,000	47	1,105	68	0,581
6	0,316	27	1,019	48	1,094	69	0,541
7	0,364	28	1,037	49	1,082	70	0,499
8	0,410	29	1,053	50	1,068	71	0,455
9	0,455	30	1,068	51	1,053	72	0,410
10	0,499	31	1,082	52	1,037	73	0,364
11	0,541	32	1,094	53	1,019	74	0,316
12	0,581	33	1,105	54	1,000	75	0,267
13	0,620	34	1,114	55	0,979	76	0,217
14	0,658	35	1,122	56	0,957	77	0,165
15	0,694	36	1,128	57	0,934	78	0,111
16	0,729	37	1,133	58	0,909	79	0,056
17	0,763	38	1,137	59	0,882	80	0,000
18	0,795	39	1,139	60	0,855	0,25	0,014
19	0,825	40	1,140	61	0,825		
20	0,855	41	1,139	62	0,795		

Adapun perhitungan *layout* tendon prategang untuk penampang persegi sebagai berikut..

a. Bagian Tengah Bentang Penampang Persegi

Susunan (*layout*) tendon prategang pada bagian tengah bentang dapat dilihat pada **Gambar 5.12** berikut ini.



**Gambar 5.12 Layout Tendon di Tengah Bentang Penampang Persegi**

Jarak dari alas balok girder ke as tendon baris 1 ( $a$ ) = 0,1 m

Jarak dari alas balok girder ke titik berat tendon ( $z_0$ ) = 0,502 m

Jarak vertikal dari as ke as tendon ( $y_d$ ) =  $\frac{(z_0 - a)}{2}$

=  $\frac{(0,502 - 0,1)}{2}$

= 0,20 m

Jarak tiap baris tendon terhadap alas,

Baris 1 :  $Z_1 = a + 4 \cdot y_d = 0,1 + 4 \cdot 0,2 = 0,90$  m

Baris 2 :  $Z_2 = a + 3 \cdot y_d = 0,1 + 3 \cdot 0,20 = 0,70$  m

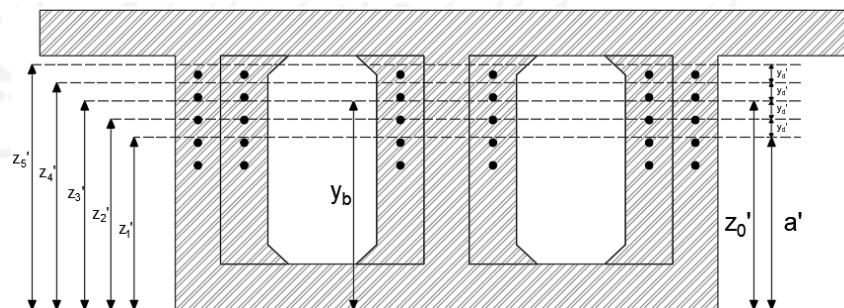
Baris 3 :  $Z_3 = a + 2 \cdot y_d = 0,1 + 2 \cdot 0,20 = 0,50$  m

Baris 4 :  $Z_4 = a + y_d = 0,1 + 0,20 = 0,30$  m

Baris 5 :  $Z_5 = a = 0,20 = 0,20$  m

b. Bagian Ujung Bentang Penampang Persegi

Susunan (*layout*) tendon prategang pada bagian ujung bentang dapat dilihat pada **Gambar 5.13** berikut ini.



**Gambar 5.13 Layout Tendon di Ujung Bentang Penampang Persegi**

Jarak antar tendon ( $y_d'$ ) = 0,38 m

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak dari alas girder ke tendon bawah (} a' \text{)} &= \frac{(yb - yd')}{2} \\
 &= \frac{(1,840 - 0,38)}{2} \\
 &= 0,730 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jarak tiap baris tendon terhadap alas,

$$\text{Baris 1 : } Z_1' = a' + 4 \cdot yd' = 0,730 + 4 \cdot 0,4 = 2,25 \text{ m}$$

$$\text{Baris 2 : } Z_2' = a' + 3 \cdot yd' = 0,730 + 3 \cdot 0,4 = 1,87 \text{ m}$$

$$\text{Baris 3 : } Z_3' = a' + 2 \cdot yd' = 0,730 + 2 \cdot 0,4 = 1,49 \text{ m}$$

$$\text{Baris 4 : } Z_4' = a' + yd' = 0,730 + 0,4 = 1,11 \text{ m}$$

$$\text{Baris 5 : } Z_5' = a' = 0,730 = 0,73 \text{ m}$$

c. Eksentrisitas Tiap Tendon

$$\text{Baris 1 : } f_1 = Z_1' - Z_1 = 2,25 - 0,90 = 1,35 \text{ m}$$

$$\text{Baris 2 : } f_2 = Z_2' - Z_2 = 1,87 - 0,70 = 1,17 \text{ m}$$

$$\text{Baris 3 : } f_3 = Z_3' - Z_3 = 1,49 - 0,50 = 0,99 \text{ m}$$

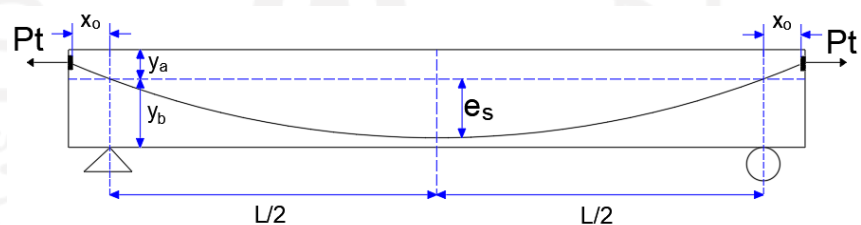
$$\text{Baris 4 : } f_4 = Z_4' - Z_4 = 1,11 - 0,30 = 0,81 \text{ m}$$

$$\text{Baris 5 : } f_5 = Z_5' - Z_5 = 0,73 - 0,20 = 0,63 \text{ m}$$

d. Lintasan Tendon

Lintasan tendon dari ujung hingga tengah bentang dapat dilihat pada

**Gambar 5.14** berikut ini.



**Gambar 5.14** Lintasan Tendon

$$\begin{aligned}
 \text{Eksentrisitas tendon (} e_s \text{)} &= \frac{f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5}{5} \\
 &= \frac{1,35 + 1,17 + 0,99 + 0,81 + 0,63}{5} \\
 &= 0,99 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Persamaan lintasan tendon adalah  $4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot L - X$  dengan  $f = e_s$ .

$$\begin{aligned} \text{Lintasan inti tendon} &= 4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot L - X \\ &= 4 \cdot 0,99 \cdot \frac{1}{80^2} \cdot 80 - 1 \\ &= 0,049 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, nilai eksentrisitas tendon berada pada jarak 0,99 meter dari bagian alas *box girder*. Hasil perhitungan lintasan tendon dapat dilihat pada **Tabel 5.19**.

**Tabel 5.19 Perhitungan Lintasan Tendon Penampang Persegi**

X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
-0,25	-0,012	21	0,765	42	0,986	63	0,661
1	0,049	22	0,788	43	0,983	64	0,632
2	0,096	23	0,810	44	0,978	65	0,602
3	0,143	24	0,830	45	0,973	66	0,571
4	0,188	25	0,849	46	0,966	67	0,538
5	0,232	26	0,867	47	0,958	68	0,504
6	0,274	27	0,884	48	0,949	69	0,469
7	0,316	28	0,899	49	0,938	70	0,432
8	0,356	29	0,913	50	0,926	71	0,395
9	0,395	30	0,926	51	0,913	72	0,356
10	0,432	31	0,938	52	0,899	73	0,316
11	0,469	32	0,949	53	0,884	74	0,274
12	0,504	33	0,958	54	0,867	75	0,232
13	0,538	34	0,966	55	0,849	76	0,188
14	0,571	35	0,973	56	0,830	77	0,143
15	0,602	36	0,978	57	0,810	78	0,096
16	0,632	37	0,983	58	0,788	79	0,049
17	0,661	38	0,986	59	0,765	80	0,000
18	0,689	39	0,987	60	0,741	0,25	0,012
19	0,716	40	0,988	61	0,716		
20	0,741	41	0,987	62	0,689		

e. Tata Letak Kabel Tendon

Tata letak kabel tendon dihitung pada masing masing baris tendon.

Persamaan untuk posisi masing – masing kabel :

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

Panjang bentang *box girder* (L) = 80 m

Jarak dari alas balok girder ke titik berat tendon ( $z_0$ ) = 0,25 m

Perhitungan pada jarak  $X = 0$

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

$$= 2,50 - 4 \cdot 1,05 \cdot \frac{0}{80} (80 - 0)$$

$$= 2,352 \text{ m}$$

Hasil perhitungan letak kabel (*layout*) tendon penampang trapesium dapat dilihat pada **Tabel 5.20** berikut.

**Tabel 5.20 Perhitungan *Layout* Tendon Penampang Trapesium**

Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
0	1,642	2,562	2,102	1,642	1,182	0,722
1	1,585	2,480	2,032	1,585	1,138	0,691
2	1,530	2,400	1,965	1,530	1,096	0,661
3	1,477	2,322	1,900	1,477	1,054	0,632
4	1,425	2,247	1,836	1,425	1,014	0,603
5	1,374	2,173	1,774	1,374	0,975	0,576
6	1,325	2,102	1,713	1,325	0,937	0,549
7	1,278	2,032	1,655	1,278	0,900	0,523
8	1,231	1,965	1,598	1,231	0,865	0,498
9	1,186	1,900	1,543	1,186	0,830	0,473
10	1,143	1,836	1,490	1,143	0,796	0,450
11	1,101	1,775	1,438	1,101	0,764	0,427
12	1,060	1,716	1,388	1,060	0,732	0,405
13	1,021	1,659	1,340	1,021	0,702	0,383
14	0,983	1,604	1,294	0,983	0,673	0,363
15	0,947	1,551	1,249	0,947	0,645	0,343
16	0,912	1,501	1,206	0,912	0,618	0,324
17	0,879	1,452	1,165	0,879	0,592	0,305

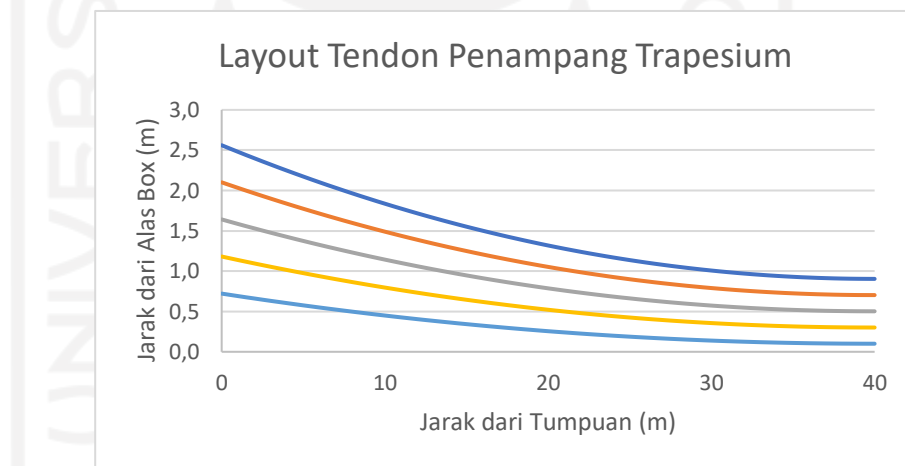


Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
18	0,847	1,405	1,126	0,847	0,567	0,288
19	0,816	1,361	1,088	0,816	0,544	0,271
20	0,787	1,318	1,053	0,787	0,521	0,255
21	0,759	1,278	1,019	0,759	0,500	0,240
22	0,733	1,240	0,986	0,733	0,479	0,226
23	0,708	1,203	0,956	0,708	0,460	0,212
24	0,684	1,169	0,927	0,684	0,442	0,199
25	0,662	1,137	0,900	0,662	0,425	0,187
26	0,642	1,107	0,874	0,642	0,409	0,176
27	0,622	1,079	0,851	0,622	0,394	0,166
28	0,605	1,053	0,829	0,605	0,380	0,156
29	0,588	1,029	0,809	0,588	0,368	0,147
30	0,573	1,008	0,790	0,573	0,356	0,139
31	0,560	0,988	0,774	0,560	0,346	0,131
32	0,548	0,970	0,759	0,548	0,336	0,125
33	0,537	0,955	0,746	0,537	0,328	0,119
34	0,528	0,941	0,734	0,528	0,321	0,114
35	0,520	0,930	0,725	0,520	0,315	0,110
36	0,513	0,921	0,717	0,513	0,310	0,106
37	0,508	0,913	0,711	0,508	0,306	0,103
38	0,505	0,908	0,706	0,505	0,303	0,102
39	0,503	0,905	0,704	0,503	0,302	0,100
40	0,502	0,904	0,703	0,502	0,301	0,100
41	0,503	0,905	0,704	0,503	0,302	0,100
42	0,505	0,908	0,706	0,505	0,303	0,102
43	0,508	0,913	0,711	0,508	0,306	0,103
44	0,513	0,921	0,717	0,513	0,310	0,106
45	0,520	0,930	0,725	0,520	0,315	0,110

Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
46	0,528	0,941	0,734	0,528	0,321	0,114
47	0,537	0,955	0,746	0,537	0,328	0,119
48	0,548	0,970	0,759	0,548	0,336	0,125
49	0,560	0,988	0,774	0,560	0,346	0,131
50	0,573	1,008	0,790	0,573	0,356	0,139
51	0,588	1,029	0,809	0,588	0,368	0,147
52	0,605	1,053	0,829	0,605	0,380	0,156
53	0,622	1,079	0,851	0,622	0,394	0,166
54	0,642	1,107	0,874	0,642	0,409	0,176
55	0,662	1,137	0,900	0,662	0,425	0,187
56	0,684	1,169	0,927	0,684	0,442	0,199
57	0,708	1,203	0,956	0,708	0,460	0,212
58	0,733	1,240	0,986	0,733	0,479	0,226
59	0,759	1,278	1,019	0,759	0,500	0,240
60	0,787	1,318	1,053	0,787	0,521	0,255
61	0,816	1,361	1,088	0,816	0,544	0,271
62	0,847	1,405	1,126	0,847	0,567	0,288
63	0,879	1,452	1,165	0,879	0,592	0,305
64	0,912	1,501	1,206	0,912	0,618	0,324
65	0,947	1,551	1,249	0,947	0,645	0,343
66	0,983	1,604	1,294	0,983	0,673	0,363
67	1,021	1,659	1,340	1,021	0,702	0,383
68	1,060	1,716	1,388	1,060	0,732	0,405
69	1,101	1,775	1,438	1,101	0,764	0,427
70	1,143	1,836	1,490	1,143	0,796	0,450
71	1,186	1,900	1,543	1,186	0,830	0,473
72	1,231	1,965	1,598	1,231	0,865	0,498
73	1,278	2,032	1,655	1,278	0,900	0,523

Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
74	1,325	2,102	1,713	1,325	0,937	0,549
75	1,374	2,173	1,774	1,374	0,975	0,576
76	1,425	2,247	1,836	1,425	1,014	0,603
77	1,477	2,322	1,900	1,477	1,054	0,632
78	1,530	2,400	1,965	1,530	1,096	0,661
79	1,585	2,480	2,032	1,585	1,138	0,691
80	1,642	2,562	2,102	1,642	1,182	0,722

Gambar letak posisi kabel tendon dari ujung hingga tengah bentang penampang trapesium dapat dilihat pada **Gambar 5.15** berikut.



**Gambar 5.15** Lintasan Kabel Tendon Penampang Trapesium

Hasil perhitungan letak kabel (*layout*) tendon penampang trapesium dapat dilihat pada **Tabel 5.21** berikut.

**Tabel 5.21** Perhitungan *Layout* Tendon Penampang Persegi

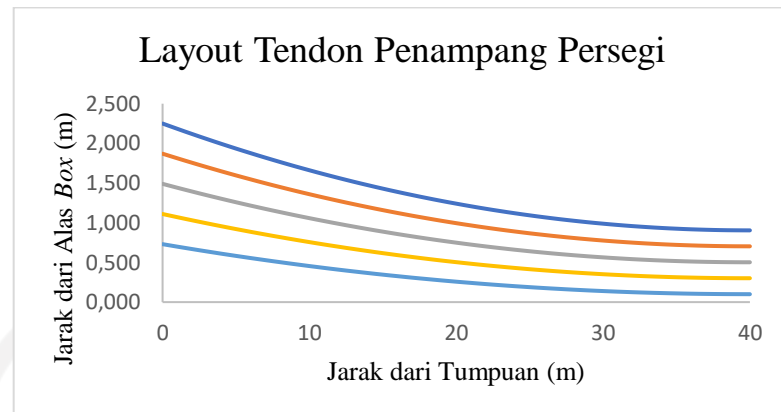
Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
0	1,490	2,250	1,870	1,490	1,110	0,730
1	1,441	2,184	1,812	1,441	1,070	0,699
2	1,394	2,119	1,756	1,394	1,031	0,669
3	1,347	2,056	1,702	1,347	0,993	0,639

Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
4	1,302	1,994	1,648	1,302	0,956	0,610
5	1,259	1,935	1,597	1,259	0,920	0,582
6	1,216	1,877	1,546	1,216	0,886	0,555
7	1,175	1,820	1,497	1,175	0,852	0,529
8	1,134	1,766	1,450	1,134	0,819	0,503
9	1,095	1,713	1,404	1,095	0,787	0,478
10	1,058	1,661	1,359	1,058	0,756	0,454
11	1,021	1,612	1,316	1,021	0,726	0,431
12	0,986	1,564	1,275	0,986	0,697	0,409
13	0,952	1,517	1,235	0,952	0,670	0,387
14	0,919	1,473	1,196	0,919	0,643	0,366
15	0,888	1,430	1,159	0,888	0,617	0,346
16	0,858	1,389	1,123	0,858	0,592	0,327
17	0,829	1,349	1,089	0,829	0,569	0,308
18	0,801	1,311	1,056	0,801	0,546	0,291
19	0,774	1,275	1,025	0,774	0,524	0,274
20	0,749	1,241	0,995	0,749	0,503	0,258
21	0,725	1,208	0,966	0,725	0,484	0,242
22	0,702	1,177	0,939	0,702	0,465	0,228
23	0,680	1,147	0,914	0,680	0,447	0,214
24	0,660	1,119	0,890	0,660	0,430	0,201
25	0,641	1,093	0,867	0,641	0,415	0,189
26	0,623	1,069	0,846	0,623	0,400	0,177
27	0,606	1,046	0,826	0,606	0,386	0,167
28	0,591	1,025	0,808	0,591	0,374	0,157
29	0,577	1,006	0,791	0,577	0,362	0,148
30	0,564	0,988	0,776	0,564	0,352	0,139
31	0,552	0,972	0,762	0,552	0,342	0,132

Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
32	0,542	0,958	0,750	0,542	0,333	0,125
33	0,532	0,945	0,739	0,532	0,326	0,119
34	0,524	0,934	0,729	0,524	0,319	0,114
35	0,517	0,925	0,721	0,517	0,314	0,110
36	0,512	0,917	0,715	0,512	0,309	0,106
37	0,508	0,912	0,710	0,508	0,306	0,104
38	0,504	0,907	0,706	0,504	0,303	0,102
39	0,503	0,905	0,704	0,503	0,302	0,100
40	0,502	0,904	0,703	0,502	0,301	0,100
41	0,503	0,905	0,704	0,503	0,302	0,100
42	0,504	0,907	0,706	0,504	0,303	0,102
43	0,508	0,912	0,710	0,508	0,306	0,104
44	0,512	0,917	0,715	0,512	0,309	0,106
45	0,517	0,925	0,721	0,517	0,314	0,110
46	0,524	0,934	0,729	0,524	0,319	0,114
47	0,532	0,945	0,739	0,532	0,326	0,119
48	0,542	0,958	0,750	0,542	0,333	0,125
49	0,552	0,972	0,762	0,552	0,342	0,132
50	0,564	0,988	0,776	0,564	0,352	0,139
51	0,577	1,006	0,791	0,577	0,362	0,148
52	0,591	1,025	0,808	0,591	0,374	0,157
53	0,606	1,046	0,826	0,606	0,386	0,167
54	0,623	1,069	0,846	0,623	0,400	0,177
55	0,641	1,093	0,867	0,641	0,415	0,189
56	0,660	1,119	0,890	0,660	0,430	0,201
57	0,680	1,147	0,914	0,680	0,447	0,214
58	0,702	1,177	0,939	0,702	0,465	0,228
59	0,725	1,208	0,966	0,725	0,484	0,242

Jarak X (m)	Trace Z0 (m)	Posisi Baris Tendon Penampang Trapesium				
		z1	z2	z3	z4	z5
60	0,749	1,241	0,995	0,749	0,503	0,258
61	0,774	1,275	1,025	0,774	0,524	0,274
62	0,801	1,311	1,056	0,801	0,546	0,291
63	0,829	1,349	1,089	0,829	0,569	0,308
64	0,858	1,389	1,123	0,858	0,592	0,327
65	0,888	1,430	1,159	0,888	0,617	0,346
66	0,919	1,473	1,196	0,919	0,643	0,366
67	0,952	1,517	1,235	0,952	0,670	0,387
68	0,986	1,564	1,275	0,986	0,697	0,409
69	1,021	1,612	1,316	1,021	0,726	0,431
70	1,058	1,661	1,359	1,058	0,756	0,454
71	1,095	1,713	1,404	1,095	0,787	0,478
72	1,134	1,766	1,450	1,134	0,819	0,503
73	1,175	1,820	1,497	1,175	0,852	0,529
74	1,216	1,877	1,546	1,216	0,886	0,555
75	1,259	1,935	1,597	1,259	0,920	0,582
76	1,302	1,994	1,648	1,302	0,956	0,610
77	1,347	2,056	1,702	1,347	0,993	0,639
78	1,394	2,119	1,756	1,394	1,031	0,669
79	1,441	2,184	1,812	1,441	1,070	0,699
80	1,490	2,250	1,870	1,490	1,110	0,730

Gambar letak posisi kabel tendon dari ujung hingga tengah bentang penampang trapesium dapat dilihat pada **Gambar 5.16** berikut.



**Gambar 5.16** Lintasan Kabel Tendon Penampang Persegi

### 5.2.5 Loss of Prestress (Kehilangan Gaya Prategang)

Kehilangan gaya prategang dalam tendon untuk setiap waktu harus diambil sebagai jumlah dari kehilangan seketika dan kehilangan yang tergantung waktu, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Kehilangan prategang dapat dinyatakan dalam bentuk kehilangan gaya atau kehilangan tegangan didalam tendon. Pengaruh gaya prategang dibagi menjadi dua yaitu sebelum kehilangan gaya prategang dan sesudah kehilangan gaya prategang. Kehilangan gaya prategang (*loss of prestress*) dapat di kelompokkan menjadi 2 jenis yaitu kehilangan jangka pendek dan kehilangan jangka panjang.

#### 1. Kehilangan Prategang Jangka Pendek

##### a. Kehilangan tegangan akibat gesekan ankur

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

Modulus elastisitas baja prategang ( $E_s$ ) = 195000 MPa

Pergeseran ankur ( $\Delta A$ ) = 2,5 mm

Panjang *box girder* = 80 meter

$$\begin{aligned}
 \Delta f_{pA} &= \frac{\Delta A}{L} \cdot E_s \\
 &= \frac{0,0025}{80} \cdot 195000 \\
 &= 6,094 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

## b. Kehilangan Tegangan Akibat Gesekan

$$\text{Panjang bentang jembatan (x)} = 80 \text{ m}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon (x)} = 1,140 \text{ m}$$

$$\text{Sudut lintasan tendon } (\alpha) = \frac{8y}{x} = \frac{8 \cdot 1,140}{80} = 0,113 \text{ rad}$$

$$\text{Koefisien gesek } (\mu) = 0,2$$

$$\text{Bilangan natural (e)} = 2,718$$

Koefisien Wobble (K) diambil dari **Tabel 5.22** berikut. Nilai koefisien Wobble yang digunakan sebesar 0,001.

**Tabel 5.22 Koefisien Wobble**

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

(Sumber : Beton Prategang Edward G. Nawy)

Kehilangan gaya prategang akibat gesekan :

$$\begin{aligned} \Delta f_{pf} &= f_{pj} e^{-\Sigma(\mu\alpha + kL)} \\ &= 1109,269 \cdot 2,718^{-(0,2 \cdot 0,113 + 0,001 \cdot 80)} \\ &= 108,358 \text{ MPa} \end{aligned}$$

## c. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pemendekan Elastis

$$\text{Eksentrisitas tendon } (e_s) = 1,140 \text{ m}$$

$$\text{Luas tampang } \textit{box girder} (A) = 9,777 \text{ m}$$

$$\text{Berat jenis beton prategang } (w_c) = 23,1 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat tekan beton prategang } (f'_{ci}) = 40 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus elastisitas saat transfer } (E_{ci}) = 30193,706 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus elastis baja prategang } (E_s) = 195000 \text{ MPa}$$

$$\text{Jumlah total strands } (n_s) = 960 \text{ buah}$$

$$\text{Luas tampang tendon prategang } (A_{ps}) = 175118,105 \text{ mm}^2$$



Momen akibat berat sendiri box girder (MS) = 180678,7844 kNm

Modulus rasio antara baja prategang dengan box girder (n) :

$$\begin{aligned} n &= \frac{E_s}{E_{ci}} \\ &= \frac{195000}{30193,706} \\ &= 0,00646 \end{aligned}$$

Tegangan baja setelah menghitung kehilangan prategang akibat pengaruh angkur dan gesekan :

$$\begin{aligned} f_{pi} &= f_{pj} - \Delta f_{pA} - \Delta f_{pF} \\ &= 1109,269 - 6,094 - 108,358 \\ &= 994,817 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Gaya prategang setelah menghitung kehilangan prategang akibat gesekan :

$$\begin{aligned} P_i &= f_{pi} \cdot A_{ps} \\ &= 994,817 \cdot 10^{-3} \cdot 175118,105 \\ &= 174210,46 \text{ kN} \end{aligned}$$

Tegangan beton dipusat berat tendon pada saat kondisi transfer :

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_x} + \frac{M_{BS} \cdot e_s}{I_x} \\ &= -\frac{174210,46}{9,777} - \frac{174210,46 \cdot 1,05^2}{13,553} + \frac{180678,7844 \cdot 1,05}{13,553} \\ &= -19,32 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis :

$$\begin{aligned} \Delta f_{pES} &= n \cdot f_{cs} \\ &= 0,0064 \cdot 19,32 \\ &= 0,125 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Menurut Nawy (2001), kehilangan prategang pada balok pascatarik adalah setengah dari balok pratarik. Maka kehilangan prategang balok pascatarik yaitu :

$$\begin{aligned} \Delta f_{pES} &= 0,5 \cdot 0,125 \\ &= 0,062 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan baja prategang setelah kondisi transfer :

$$\begin{aligned} f_{ps} &= f_{pj} - (\Delta f_{pA} + \Delta f_{pf} + \Delta f_{pES}) \\ &= 1109,269 - (6,094 + 108,358 + 0,062) \\ &= 994,755 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Gaya prategang setelah kondisi transfer :

$$\begin{aligned} P_i &= A_{ps} \cdot f_{ps} \\ &= 175118,105 \cdot 994,755 \\ &= 174199,53 \text{ MPa} \end{aligned}$$

## 2. Kehilangan Prategang Jangka Panjang

### a. Kehilangan Prategang Akibat Pengaruh Rangkak Beton

Deformasi atau aliran lateral akibat tegangan longitudinal disebut rangkak (*creep*). Tegangan rangkak dan kehilangan tegangan hanya terjadi akibat beban yang terus menerus selama riwayat pembebanan suatu elemen struktural. Menurut Nawy (2001), nilai  $K_{CR}$  untuk komponen pascatarik sebesar 1,6 dan untuk komponen pratarik sebesar 2,0.

$$\text{Koefisien prategang } (K_{CR}) = 1,6 \text{ (pascatarik)}$$

$$\text{Modulus elastisitas baja prategang } (E_s) = 195000 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus elastisitas beton prategang } (E_c) = 33234,02 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Rasio modulus } (n) &= \frac{E_s}{E_c} \\ &= \frac{195000}{33234,02} \\ &= 5,867 \end{aligned}$$

Tegangan tendon dipusat berat beton :

$$\begin{aligned} f_{cs} &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s^2}{I_x} + \frac{M_S \cdot e_s}{I_x} \\ &= -\frac{174199,5}{9,777} - \frac{174199,5 \cdot 1,05^2}{13,553} + \frac{180678,7844 \cdot 1,05}{13,553} \\ &= -19,32 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\text{Momen akibat beban mati tambahan } (MA) = 32794 \text{ kNm}$$

Tegangan beton dipusat berat tendon saat kondisi transfer :

$$\begin{aligned} f_{csd} &= \frac{M_{SD} \cdot e_s}{I_x} \\ &= \frac{32794 \cdot 1,140}{13,553} \\ &= 2,757 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Kehilangan prategang akibat pengaruh rangkai :

$$\begin{aligned} \Delta f_{pCR} &= n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \\ &= 5,867 \cdot 1,6 \cdot (19,32 - 2,757) \\ &= 155,451 \text{ MPa} \end{aligned}$$

b. Kehilangan Prategang Akibat Pengaruh Susut

Untuk kondisi susut, *Prestressed Concrete Institute* menetapkan nilai rata – rata untuk regangan susut ultimit nominal  $(\epsilon_{SH})_U = 820 \times 10^{-6} \text{ in/in}$ . Kehilangan tegangan akibat susut dengan menggunakan metode perawatan selama 7 hari.

$$\begin{aligned} \text{Waktu perawatan (t)} &= 7 \text{ hari} \\ \text{Modulus elastisitas baja prategang} &= 195000 \text{ MPa} \\ \text{Regangan susut ultimit } (\epsilon_{SH})_U &= 0,00082 \end{aligned}$$

Regangan susut akibat perawatan basah selama 7 hari :

$$\begin{aligned} (\epsilon_{SH})_t &= \frac{t}{35 + t} (\epsilon_{SH})_U \\ &= \frac{7}{35 + 7} \cdot 0,00082 \\ &= 0,000378 \end{aligned}$$

Kehilangan prategang akibat pengaruh susut :

$$\begin{aligned} \Delta f_{pSH} &= (\epsilon_{SH})_t \cdot E_s \\ &= 0,000378 \cdot 195000 \\ &= 26,65 \text{ MPa} \end{aligned}$$

c. Kehilangan Prategang Akibat Relaksasi Tendon

Relaksasi baja dalam baja prategang adalah kehilangan prategang apabila kawat – kawat atau *strand* mengalami regangan yang pada dasarnya konstan. Ini identik dengan rangkai pada beton, dengan

perbedaan bahwa rangkai adalah perubahan regangan, sedangkan relaksasi baja adalah kehilangan tegangan pada baja.

$$\begin{aligned} t_1 &= 1 \\ t_2 &= 7 \text{ hari} \\ &= 168 \text{ jam} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta f_{pR} &= f_{pi} \left( \frac{\log t_2 - \log t_1}{45} \right) \left( \frac{f_{ps}}{f_{py}} - 0.55 \right) \\ &= f_{pi} \left( \frac{\log 168 - \log 1}{45} \right) \left( \frac{994,755}{1676} - 0.55 \right) \\ &= 2,198 \text{ MPa} \end{aligned}$$

**Tabel 5.23 Rekapitulasi Kehilangan Akibat Gaya Prategang Penampang Trapesium**

Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang Penampang Trapesium			
No	Level tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persentase (%)
	Setelah Penegangan	1109,269	100%
Kehilangan tegangan			
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	6,094	0,55%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	108,358	9,77%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	0,125	0,01%
4	Rangkai beton ( <i>creep</i> )	155,451	14,01%
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	26,650	2,40%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	2,141	0,19%
Beban mati tambahan			
1	Beban mati tambahan topping	16,178	1,46%
Tegangan akhir efektif ( $f_{pe}$ )		810,450	73,06%
Kehilangan tegangan total ( <i>loss of prestress</i> )		298,819	26,94%
Gaya efektif di tengah bentang		141924,458	kN

**Tabel 5.24 Rekapitulasi Kehilangan Akibat Gaya Prategang Penampang Persegi**

Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang Penampang Persegi			
No	Level tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persentase (%)
	Setelah Penegangan	1034,949	100%
Kehilangan tegangan			
1	Pergeseran ankur ( <i>anchorage friction</i> )	12,188	1,18%
2	Gesekan kabel ( <i>jack friction</i> )	98,266	9,49%
3	Perpendekan elastis beton ( <i>elastic shortening</i> )	0,117	0,01%
4	Rangkak beton ( <i>creep</i> )	149,357	14,43%
5	Susut beton ( <i>shrinkage</i> )	26,650	2,58%
6	Relaksasi tendon ( <i>relaxation of tendon</i> )	0,070	0,01%
Beban mati tambahan			
1	Beban mati tambahan <i>topping</i>	12,622	1,22%
Tegangan akhir efektif ( $f_{pe}$ )		748,302	72,30%
Kehilangan tegangan total ( <i>loss of prestress</i> )		286,648	27,70%
Gaya efektif di tengah bentang		163801,602	kN

### 5.2.6 Tegangan Pada Box Girder

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

Tegangan izin beton saat transfer

$$\begin{aligned} \text{Serat tarik } (f_{ti}) &= 0,25 \cdot \sqrt{f'_{ci}} \\ &= 0,25 \cdot \sqrt{40} \\ &= 1,581 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Serat tekan } (f_{ci}) &= 0,60 \cdot f'_{ci} \\ &= 0,60 \cdot 40 \\ &= 24 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan izin beton pada saat layan

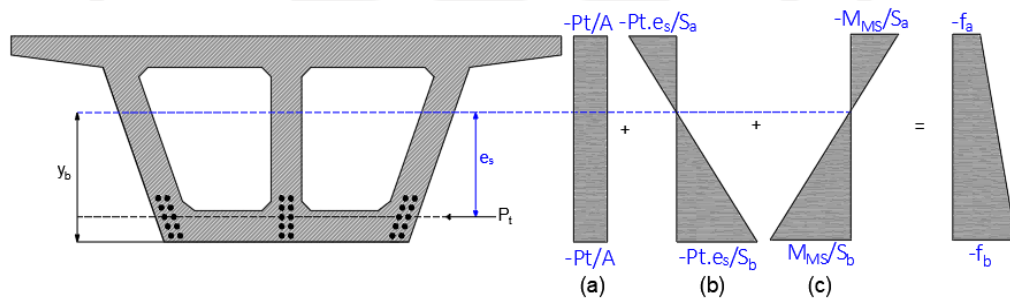
$$\begin{aligned} \text{Serat tarik } (f_{ti}) &= 0,5 \cdot \sqrt{f'_c} \\ &= 0,5 \cdot \sqrt{50} \\ &= 3,536 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Serat tekan } (f_{ci}) &= 0,40 \cdot f'_c \\ &= 0,40 \cdot 50 \\ &= 22,5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Adapun tegangan keadaan transfer pada penampang trapesium adalah sebagai berikut.

#### 1. Tegangan Keadaan Transfer Penampang Trapesium

Tegangan yang terjadi pada kondisi awal adalah kondisi pada saat penarikan tendon prategang dimana beban yang bekerja adalah beban sendiri balok seperti yang ditampilkan pada **Gambar 5.17**. Gaya yang bekerja pada kondisi transfer adalah gaya prategang awal.



**Gambar 5.17 Tegangan Saat Transfer Penampang Trapesium**

Gambar 5.17(a) nilai  $P_t/A$  menunjukkan gaya prategang bekerja secara merata pada seluruh bagian penampang balok prategang. Dimana  $A$  merupakan luas penampang balok sebesar  $9,777 \text{ m}^2$  dan  $P_t$  merupakan gaya prategang awal sebesar  $165115,092 \text{ kN}$ . Gambar 5.17(b) tegangan terjadi akibat adanya eksentrisitas yang mengakibatkan penampang balok mengalami lendutan keatas (*chamber*). Pada kondisi tersebut, serat bagian atas mengalami tegangan tarik dan serat bagian bawah mengalami tegangan tekan. Gaya prategang awal yang bekerja pada eksentrisitas tendon bagian bawah menghasilkan tegangan tekan pada serat bawah, sehingga hampir tidak ada tegangan tarik pada serat bawah saat kondisi transfer. Gambar 5.17(c) menunjukkan tegangan akibat adanya beban luar yang bekerja pada seluruh

penampang, sehingga serat bagian atas mengalami tegangan tekan dan serat bagian bawah mengalami tegangan tarik. Berikut merupakan perhitungan tegangan pada penampang trapesium saat kondisi transfer.

$$\begin{aligned}
 \text{Diameter selubung (D)} &= 86,21 \text{ mm} \\
 \text{Jumlah tendon } (n_t) &= 30 \text{ tendon} \\
 \text{Luas penampang bruto (A)} &= 9,777 \text{ m}^2 \\
 \text{Luas selubung tendon } (A_{\text{selubung}}) &= 0,175 \text{ m}^2 \\
 \text{Luas penampang netto } (A_{\text{netto}}) &= 9,602 \text{ m}^2 \\
 \text{Momen inersia penampang } (I_x) &= 13,553 \text{ m}^4 \\
 \text{Jarak terhadap sisi bawah } (y = z_0) &= 0,502 \text{ m} \\
 \text{Statis momen} &= A_{\text{selubung}} \cdot y \\
 &= 0,175 \cdot 0,502 \\
 &= 0,088 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Letak garis netral :

$$\begin{aligned}
 y_b &= ((\sum A_i \cdot y_i) - (A_{\text{selubung}} \cdot y_{\text{selubung}})) / A_{\text{netto}} \\
 &= (18,606 - 0,088) / 9,602 \\
 &= 1,929 \text{ m} \\
 y_a &= H - y_b \\
 &= 3,3 - 1,929 \\
 &= 1,371 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon (e)} = 1,427 \text{ m}$$

$$\text{Jarak terhadap titik berat (y = e)} = 1,427 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia selubung } (I_{\text{selubung}}) = 0,356 \text{ m}^4$$

$$\text{Momen inersia penampang netto } (I_{\text{netto}}) = 13,108 \text{ m}^4$$

Modulus penampang :

$$\begin{aligned}
 \text{Atas } (S_a) &= I_{\text{netto}} / y_a \\
 &= 13,108 / 1,371 \\
 &= 9,558 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Bawah } (S_b) &= I_{\text{netto}} / y_b \\
 &= 13,108 / 1,929 \\
 &= 6,797 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{Momen akibat berat sendiri (M}_{MS}) = 180678,784 \text{ kNm}$$

Tegangan yang terjadi saat transfer :

$$\text{Gaya prategang awal (P}_0) = 165115,092 \text{ kN}$$

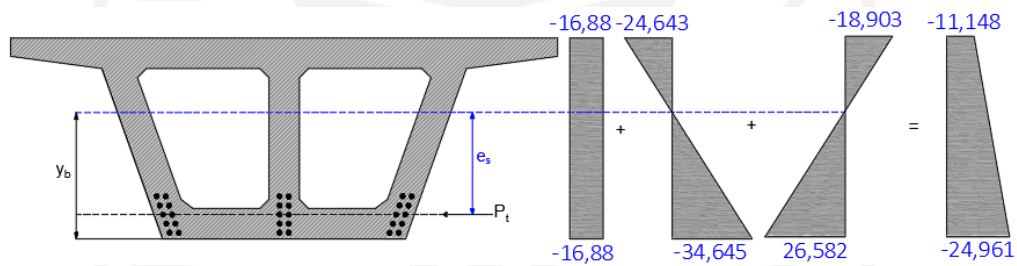
Tegangan serat atas

$$\begin{aligned} f_a &= -\frac{P_i}{A} + \frac{P_i \cdot e_s}{S_a} - \frac{M_{BS}}{S_a} \\ &= -\frac{165115,092}{9,777} + \frac{165115,092 \cdot 1,427}{9,558} - \frac{180678,784}{9,558} \\ &= -11,148 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan serat bawah

$$\begin{aligned} f_b &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_{BS}}{S_b} \\ &= -\frac{165115,092}{9,777} - \frac{165115,092 \cdot 1,679}{6,797} + \frac{180678,784}{6,797} \\ &= -24,961 \text{ MPa} \end{aligned}$$

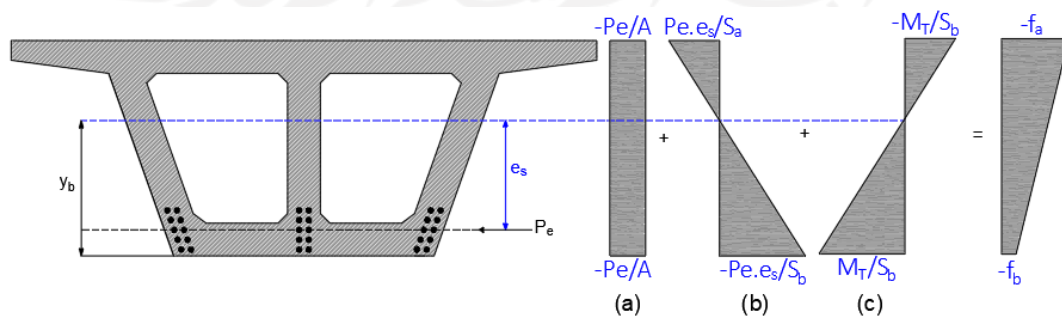
Berikut merupakan gambar tegangan dan regangan yang terjadi pada saat kondisi transfer.



**Gambar 5.18 Nilai Tegangan Saat Kondisi Transfer Penampang Trapesium**

## 2. Tegangan Keadaan Layan Penampang Trapesium

Tegangan yang terjadi pada kondisi layan adalah kondisi pada saat setelah penarikan tendon prategang dimana beban yang bekerja adalah beban sendiri balok dan beban mati tambahan seperti yang ditampilkan pada **Gambar 5.20**.



**Gambar 5.19 Tegangan Saat Layan**



Gambar 5.19(a) nilai  $P_e/A$  menunjukkan gaya prategang efektif bekerja secara merata pada seluruh bagian penampang balok prategang. Dimana  $A$  merupakan luas penampang balok dan  $P_e$  merupakan gaya prategang efektif. Gambar 5.19(b) tegangan terjadi akibat adanya eksentrisitas yang mengakibatkan penampang balok mengalami lendutan keatas (*chamber*). Pada kondisi tersebut, serat bagian atas mengalami tegangan tarik dan serat bagian bawah mengalami tegangan tekan. Gaya prategang efektif yang bekerja pada eksentrisitas tendon bagian bawah menghasilkan tegangan tekan pada serat bawah, namun tegangan tekan yang dihasilkan lebih kecil daripada tegangan tekan pada serat atas. Hal tersebut terjadi akibat kehilangan gaya prategang yang terjadi. Gambar 5.19(c) menunjukkan tegangan akibat adanya beban luar yang bekerja pada seluruh penampang, sehingga serat bagian atas mengalami tegangan tekan dan serat bagian bawah mengalami tegangan tarik. Berikut merupakan perhitungan tegangan pada kondisi layan.

Luas penampang bruto ( $A$ )	= 9,777 m <sup>2</sup>
Modulus elastisitas baja ( $E_s$ )	= 195000 MPa
Modulus elastisitas beton ( $E_c$ )	= 33234,019 MPa
Angka ekuivalensi ( $n$ )	= $\frac{E_s}{E_c}$
	= $\frac{195000}{33234,019}$
	= 5,867
Luas tampang tendon prategang ( $A_{ps}$ )	= 175118,105 mm <sup>2</sup>
Luas penampang transformasi ( $A_t$ )	= 10,629 m <sup>2</sup>
Momen inersia penampang ( $I_x$ )	= 13,553 m <sup>4</sup>
Jarak terhadap sisi bawah ( $y = z_0$ )	= 0,502 m
Statis momen = $(n - 1) (A_{ps} \cdot y^2)$	
	= $(5,867 - 1)(175118,105 - 0,502^2)$
	= 0,186 m <sup>3</sup>

Letak garis netral :

$$\begin{aligned} y_b &= ((\Sigma A_i \cdot y_i) - ((n - 1) (A_{ps} \cdot y^2)))/A_t \\ &= (18,606 - 0,186) / 10,629 \\ &= 1,710 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_a &= H - y_b \\ &= 3,3 - 1,710 \\ &= 1,590 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon (e)} = 1,208 \text{ m}$$

Momen inersia penampang netto :

$$\text{Jarak terhadap titik berat (y = e)} = 1,208 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia selubung tendon (I}_{selubung}) = 1,244 \text{ m}^4$$

$$\text{Momen inersia penampang transformasi (I}_{trans}) = 14,797 \text{ m}^4$$

Modulus penampang trapesium :

$$\begin{aligned} \text{Atas (S}_a) &= I_{trans} / y_a \\ &= 14,797 / 1,590 \\ &= 9,307 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Bawah (S}_b) &= I_{trans} / y_b \\ &= 14,894 / 1,710 \\ &= 8,652 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Gaya prategang efektif (P}_{eff}) = 141924,458 \text{ kN}$$

$$\text{Momen yg bekerja saat layan (M}_T) = 281007,663 \text{ kNm}$$

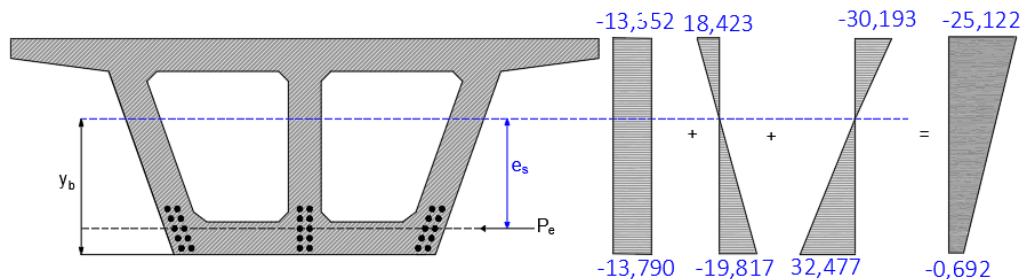
Tegangan serat atas

$$\begin{aligned} f_a &= -\frac{P_e}{A} + \frac{P_e \cdot es}{S_a} - \frac{M_T}{S_a} \\ &= -\frac{141924,458}{9,777} + \frac{141924,458 \cdot 1,208}{9,307} - \frac{281007,663}{9,307} \\ &= -25,122 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan serat bawah

$$\begin{aligned} f_b &= -\frac{P_e}{A} - \frac{P_e \cdot es}{S_b} + \frac{M_T}{S_b} \\ &= -\frac{141924,458}{9,777} - \frac{141924,458 \cdot 1,208}{8,652} + \frac{281007,663}{8,652} \\ &= -0,692 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Berikut merupakan gambar tegangan dan regangan yang terjadi pada saat kondisi layan.

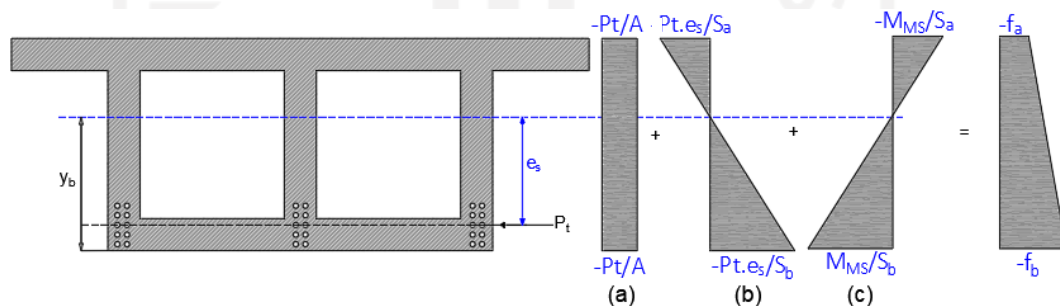


**Gambar 5.20 Nilai Tegangan Saat Kondisi Layan Penampang Trapesium**

Adapun tegangan keadaan transfer pada penampang persegi adalah sebagai berikut.

1. Tegangan Keadaan Transfer Penampang Persegi

Tegangan yang terjadi pada kondisi awal adalah kondisi pada saat penarikan tendon prategang dimana beban yang bekerja adalah beban sendiri balok seperti yang ditampilkan pada **Gambar 5.21**. Gaya yang bekerja pada kondisi transfer adalah gaya prategang awal. Gaya prategang awal yang bekerja pada eksentrisitas tendon bagian bawah menghasilkan tegangan tekan pada serat bawah, sehingga hampir tidak ada tegangan tarik pada serat bawah saat kondisi transfer.



**Gambar 5.21 Tegangan Saat Transfer Penampang Persegi**

Gambar 5.21(a) nilai  $P_t/A$  menunjukkan gaya prategang bekerja secara merata pada seluruh bagian penampang balok prategang. Dimana  $A$  merupakan luas penampang balok sebesar  $11,040 \text{ m}^2$  dan  $P_t$  merupakan gaya prategang awal sebesar  $192565,719 \text{ kN}$ . Gambar 5.21(b) tegangan terjadi akibat adanya eksentrisitas yang mengakibatkan penampang balok mengalami lendutan keatas (*chamber*). Pada kondisi tersebut, serat bagian atas mengalami tegangan tarik dan serat bagian bawah mengalami tegangan tekan. Gaya prategang awal yang bekerja

pada eksentrisitas tendon bagian bawah menghasilkan tegangan tekan pada serat bawah, sehingga hampir tidak ada tegangan tarik pada serat bawah saat kondisi transfer. Gambar 5.21(c) menunjukkan tegangan akibat adanya beban luar yang bekerja pada seluruh penampang, sehingga serat bagian atas mengalami tegangan tekan dan serat bagian bawah mengalami tegangan tarik. Berikut merupakan perhitungan tegangan pada penampang persegi saat kondisi transfer.

Diameter selubung (D)	= 96,39 mm
Jumlah tendon ( $n_t$ )	= 30 tendon
Luas penampang bruto (A)	= 11,040 m <sup>2</sup>
Luas selubung tendon ( $A_{selubung}$ )	= 0,219 m <sup>2</sup>
Luas penampang netto ( $A_{netto}$ )	= 10,821 m <sup>2</sup>
Momen inersia penampang ( $I_x$ )	= 15,063 m <sup>4</sup>
Jarak terhadap sisi bawah ( $y = z_0$ )	= 0,502 m
Statis momen	= $A_{selubung} \cdot y$ = 0,219 · 0,502 = 0,110 m <sup>3</sup>

Letak garis netral :

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

$$= (20,316 - 0,110) / 10,821$$

$$= 1,867 \text{ m}$$

$$y_a = H - y_b$$

$$= 3,3 - 1,867$$

$$= 1,433 \text{ m}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon (e)} = 1,365 \text{ m}$$

$$\text{Jarak terhadap titik berat (y = e)} = 1,365 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia selubung (I}_{selubung}) = 0,408 \text{ m}^4$$

$$\text{Momen inersia penampang netto (I}_{netto}) = 14,545 \text{ m}^4$$

Modulus penampang :

$$\text{Atas (S}_a) = I_{netto} / y_a$$

$$= 14,545 / 1,867$$

$$= 10,152 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned}
 \text{Bawah } (S_b) &= I_{\text{netto}} / y_b \\
 &= 14,431 / 1,433 \\
 &= 7,789 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\text{Momen akibat berat sendiri } (M_{MS}) = 204019,200 \text{ kNm}$$

Tegangan yang terjadi saat transfer :

$$\text{Gaya prategang awal } (P_0) = 192565,719 \text{ kN}$$

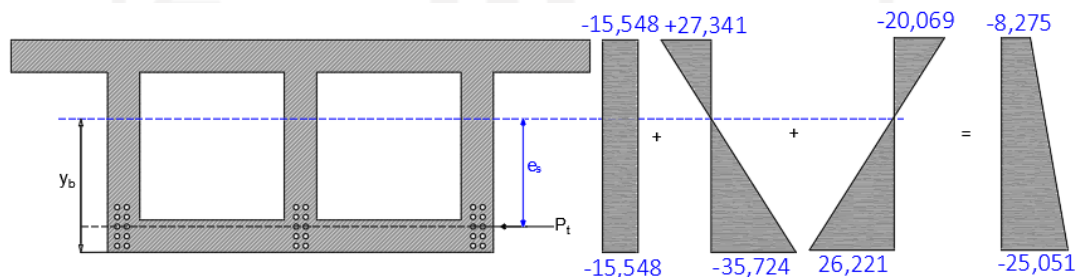
Tegangan serat atas

$$\begin{aligned}
 f_a &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot es}{S_a} + \frac{M_{BS}}{S_a} \\
 &= -\frac{192565,719}{11,040} - \frac{192565,719 \cdot 1,5}{10,152} + \frac{204019,200}{10,152} \\
 &= -11,642 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Tegangan serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_b &= -\frac{P_i}{A} - \frac{P_i \cdot es}{S_b} + \frac{M_{BS}}{S_b} \\
 &= -\frac{192565,719}{11,040} - \frac{192565,719 \cdot 1,5}{7,789} + \frac{204019,200}{7,789} \\
 &= -25,003 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

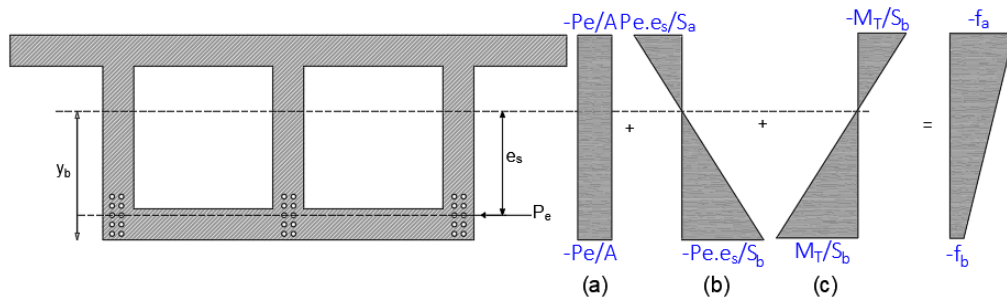
Berikut merupakan gambar tegangan dan regangan yang terjadi pada saat kondisi transfer.



**Gambar 5.22 Nilai Tegangan Kondisi Transfer Penampang Persegi**

## 2. Tegangan Keadaan Layan Penampang Persegi

Tegangan yang terjadi pada kondisi layan adalah kondisi pada saat setelah penarikan tendon prategang dimana beban yang bekerja adalah beban sendiri balok dan beban mati tambahan seperti yang ditampilkan pada **Gambar 5.24**.



**Gambar 5.23 Tegangan Saat Layan Penampang Persegi**

Gambar 5.23(a) nilai  $P_e/A$  menunjukkan gaya prategang efektif bekerja secara merata pada seluruh bagian penampang balok prategang. Dimana  $A$  merupakan luas penampang balok dan  $P_e$  merupakan gaya prategang efektif. Gambar 5.23(b) tegangan terjadi akibat adanya eksentrisitas yang mengakibatkan penampang balok mengalami lendutan keatas (*chamber*). Pada kondisi tersebut, serat bagian atas mengalami tegangan tarik dan serat bagian bawah mengalami tegangan tekan. Gaya prategang efektif yang bekerja pada eksentrisitas tendon bagian bawah menghasilkan tegangan tekan pada serat bawah, namun tegangan tekan yang dihasilkan lebih kecil daripada tegangan tekan pada serat atas. Hal tersebut terjadi akibat kehilangan gaya prategang yang terjadi. Gambar 5.23(c) menunjukkan tegangan akibat adanya beban luar yang bekerja pada seluruh penampang, sehingga serat bagian atas mengalami tegangan tekan dan serat bagian bawah mengalami tegangan tarik. Berikut merupakan perhitungan tegangan pada kondisi layan. Berikut merupakan perhitungan tegangan pada kondisi layan.

Luas penampang bruto ( $A$ )	= 11,040 m <sup>2</sup>
Modulus elastisitas baja ( $E_s$ )	= 195000 MPa
Modulus elastisitas beton ( $E_c$ )	= 33234,019 MPa
Angka ekuivalensi ( $n$ )	= $\frac{E_s}{E_c}$
	= $\frac{195000}{33234,019}$
	= 5,867
Luas tampang tendon prategang ( $A_{ps}$ )	= 218897,631 mm <sup>2</sup>
Luas penampang transformasi ( $A_t$ )	= 12,105 m <sup>2</sup>
Momen inersia penampang ( $I_x$ )	= 15,063 m <sup>4</sup>

$$\text{Jarak terhadap sisi bawah (y = } z_0) = 0,502 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Statis momen} &= (n - 1) (A_{ps} \cdot y^2) \\ &= (5,867 - 1) (218897,631 - 0,502^2) \\ &= 0,535 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Letak garis netral :

$$\begin{aligned} y_b &= ((\sum A_i \cdot y_i) - ((n - 1) (A_{ps} \cdot y^2)))/A_t \\ &= (20,316 - 0,535) / 12,105 \\ &= 1,634 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_a &= H - y_b \\ &= 3,3 - 1,634 \\ &= 1,666 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon (e)} = 1,132 \text{ m}$$

Momen inersia penampang transformasi :

$$\text{Jarak terhadap titik berat (y = e)} = 1,132 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia selubung tendon (I}_{selubung}) = 1,365 \text{ m}^4$$

$$\text{Momen inersia penampang transformasi (I}_{trans}) = 16,428 \text{ m}^4$$

Modulus penampang

$$\begin{aligned} \text{Atas (S}_a) &= I_{trans} / y_a \\ &= 16,428 / 1,634 \\ &= 9,861 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Bawah (S}_b) &= I_{trans} / y_b \\ &= 16,720 / 1,666 \\ &= 10,054 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Gaya prategang efektif (P}_{eff}) = 163801,6023 \text{ kN}$$

$$\text{Momen yg bekerja saat layan (M}_T) = 306682,120 \text{ kNm}$$

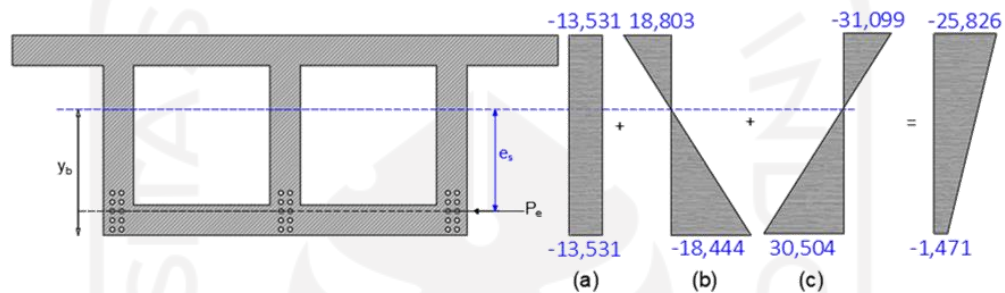
Tegangan serat atas

$$\begin{aligned} f_a &= -\frac{P_e}{A} + \frac{P_e \cdot es}{S_a} - \frac{M_T}{S_a} \\ &= -\frac{163801,6023}{11,040} + \frac{163801,6023 \cdot 1,132}{9,861} - \frac{306682,120}{9,861} \\ &= -25,709 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Tegangan serat bawah

$$\begin{aligned}
 f_b &= -\frac{P_e}{A} - \frac{P_e \cdot e_s}{S_b} + \frac{M_T}{S_b} \\
 &= -\frac{163801,6023}{11,040} - \frac{163801,6023 \cdot 1,132}{10,054} + \frac{306682,120}{10,054} \\
 &= -1,471 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Berikut merupakan gambar tegangan dan regangan yang terjadi pada saat kondisi layan.



**Gambar 5.24 Nilai Tegangan Kondisi Layan Penampang Persegi**

### 5.2.7 Momen Ultimit Pada *Box Girder*

#### 1. Kapasitas Momen Ultimit Penampang Trapesium

Berikut merupakan perhitungan momen ultimit pada penampang trapesium.

Modulus elastisitas baja ASTM A-416 ( $E_s$ ) = 195000 Mpa

Jumlah total strands ( $n_s$ ) = 960 strand

Luas tampang nominal satu strands ( $A_{st}$ ) = 182,41 mm<sup>2</sup>

Tegangan leleh tendon baja prategang ( $f_{py}$ ) = 1676 MPa

Luas tampang tendon baja prategang ( $A_{ps}$ ) = 175118,1048 mm<sup>2</sup>

Kuat tekan beton ( $f'_c$ ) = 50 Mpa

Tegangan batas prategang dalam keadaan ulimit ditetapkan sebagai berikut :

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'_c} \right)$$

Gaya prategang efektif ( $P_{eff}$ ) = 141924,458 kN

Tegangan efektif prategang ( $f_{eff}$ ) =  $\frac{P_{eff}}{A_{ps}}$

$$= \frac{141924,458}{175118,1048}$$

= 810,449 MPa



$$\begin{aligned}
 \text{Lebar flens } \textit{box girder} (b) &= B_1 + (2 \cdot B_2) \\
 &= 6 + (2 \cdot 1,5) \\
 &= 9 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Tinggi efektif } \textit{box girder} (d) &= y_a + e_s \\
 &= 1,379 + 1,401 \\
 &= 2,798 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rasio luas penampang baja prategang } (\rho_p) &= \frac{A_{ps}}{b \cdot d} \\
 &= \frac{175118,1048}{9 \cdot 2,798} \\
 &= 0,0069
 \end{aligned}$$

$$\text{Untuk baja } \textit{Low Relaxation} (\gamma_p) = 0,4$$

$$\beta_1 = 0,693$$

Tegangan batas prategang dalam keadaan ulimit :

$$\begin{aligned}
 f_{ps} &= f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'c} \right) \\
 &= 1860 \left( 1 - \frac{0,4 \cdot 0,0069 \cdot 1860}{0,693 \cdot 50} \right) \\
 &= 1582,212 \text{ MPa} > 0,85 f_{py} = 1340,8 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Maka digunakan  $f_{ps} = 1340,8 \text{ MPa}$

Cek daktilitas penampang :

$$\begin{aligned}
 \omega_p &= \frac{\rho_p \cdot f_{ps}}{f'c} \\
 &= \frac{0,0069 \cdot 1340,8}{50} \\
 &= 0,186 < 0,36 \beta_1 = 0,25 \text{ (penampang daktilail)}
 \end{aligned}$$

Gaya internal baja tendon prategang :

$$\begin{aligned}
 T_{ps} &= A_{ps} \cdot f_{ps} \\
 &= 175118,1048 \cdot 1340,8 \\
 &= 234798,355 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tinggi blok tekan :

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0,85 f'c b} \\
 &= \frac{175118,1048 \cdot 1340,8}{0,85 \cdot 50 \cdot 9} \\
 &= 0,614
 \end{aligned}$$

Momen nominal :

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left(d - \frac{a}{2}\right) \\
 &= 175118,1048 \cdot 1340,8 \left(2,798 - \frac{0,614}{2}\right) \\
 &= 584900,088
 \end{aligned}$$

Faktor reduksi kuat lentur ( $\phi$ ) = 0,8

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas ultimit } \mu_u \text{ (Mu)} &= \phi M_n \\
 &= 0,8 \cdot 584900,088 \\
 &= 467920,07 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

## 2. Momen Ultimit Akibat Beban Penampang Trapesium

Berikut merupakan momen ultimit pada penampang trapesium akibat beban yang bekerja pada box girder.

**Tabel 5.25 Momen Ultimit Akibat Beban Penampang Trapesium**

Aksi beban	Kode	Faktor beban	Momen (kNm)	Momen Ultimit
Berat mati sendiri	MS	1,3	180678,784	234882,419
Berat mati tambahan	MA	2	32794	65588
Beban pejalan kaki	TP	1,8	12000	21600
Beban lajur "D"	TD	1,8	37461,6	67430,88
Beban rem	TB	1,8	3470	6246
Beban angin	EW	1	5256	5256
Beban gempa	EQ	1	21347,278	21347,278
Total Momen Ultimit yang bekerja				422350,578
<b>Muk &gt; Mn</b>	467920,07	>	422350,5782	OK

Berikut ini merupakan rekapitulasi momen ultimit pada penampang persegi.

### 1. Kapasitas Momen Ultimit Penampang Persegi

Modulus elastisitas baja ASTM A-416 ( $E_s$ ) = 195000 MPa

Jumlah total strands (ns) = 1200 strand

Luas tampang nominal satu strands ( $A_{st}$ ) = 182,41 mm<sup>2</sup>

Tegangan leleh tendon baja prategang ( $f_{py}$ ) = 1676 MPa

Luas tampang tendon baja prategang ( $A_{ps}$ ) = 218897,631 mm<sup>2</sup>

Kuat tekan beton ( $f'_c$ ) = 50 MPa

Tegangan batas prategang dalam keadaan ulimit ditetapkan sebaga berikut :

$$f_{ps} = f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'_c} \right)$$

Gaya prategang efektif ( $P_{eff}$ ) = 167435,5203 kN

$$\begin{aligned} \text{Tegangan efektif prategang } (f_{eff}) &= \frac{P_{eff}}{A_{ps}} \\ &= \frac{163801,6023}{218897,631} \\ &= 764,903 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lebar flens } box \text{ girder } (b) &= B_1 + (2 \cdot B_2) \\ &= 6 + (2 \cdot 1,5) \\ &= 9 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tinggi efektif box girder } (d) &= y_a + e_s \\ &= 1,46 + 1,34 \\ &= 2,798 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rasio luas penampang baja prategang } (\rho_p) &= \frac{A_{ps}}{b \cdot d} \\ &= \frac{218897,631}{9 \cdot 2,798} \\ &= 0,00869 \end{aligned}$$

Untuk baja *Low Relaxation* ( $\gamma_p$ ) = 0,4

$\beta_1$  = 0,693

Tegangan batas prategang dalam keadaan ulimit :

$$\begin{aligned}
 f_{ps} &= f_{pu} \left( 1 - \frac{\gamma_p \cdot \rho_p \cdot f_{pu}}{\beta_1 \cdot f'c} \right) \\
 &= 1860 \left( 1 - \frac{0,4 \cdot 0,00869 \cdot 1860}{0,693 \cdot 50} \right) \\
 &= 1512,765 \text{ MPa} > 0,85 f_{py} = 1340,8 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Maka digunakan  $f_{ps} = 1340,8 \text{ MPa}$

Cek daktilitas penampang :

$$\begin{aligned}
 \omega_p &= \frac{\rho_p \cdot f_{ps}}{f'c} \\
 &= \frac{0,00869 \cdot 1340,8}{50} \\
 &= 0,233 < 0,36 \beta_1 = 0,25 \text{ (penampang daktail)}
 \end{aligned}$$

Gaya internal baja tendon prategang :

$$\begin{aligned}
 T_{ps} &= A_{ps} \cdot f_{ps} \\
 &= 218897,631 \cdot 1340,8 \\
 &= 293497,944 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tinggi blok tekan :

$$\begin{aligned}
 a &= \frac{A_{ps} \cdot f_{ps}}{0,85 f'c b} \\
 &= \frac{218897,631 \cdot 1340,8}{0,85 \cdot 50 \cdot 9} \\
 &= 0,767
 \end{aligned}$$

Momen nominal :

$$\begin{aligned}
 M_n &= A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left( d - \frac{a}{2} \right) \\
 &= 218897,631 \cdot 1340,8 \left( 2,798 - \frac{0,767}{2} \right) \\
 &= 708604,576 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Faktor reduksi kuat lentur ( $\phi$ ) = 0,8

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas ulimit } box \text{ (Mu)} &= \phi M_n \\
 &= 0,8 \cdot 708604,576 \\
 &= 566883,661 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

## 2. Momen Ultimit Akibat Beban Penampang Persegi

Berikut merupakan momen ultimit pada penampang persegi akibat beban yang bekerja pada *box girder*.

**Tabel 5.26 Momen Ultimit Akibat Beban Penampang Persegi**

Aksi beban	Kode	Faktor beban	Momen (kNm)	Momen Ultimit
Berat mati sendiri	MS	1.3	204019,200	263062,8
Berat mati tambahan	MA	2	32794	65588
Beban pejalan kaki	TP	1.8	12000	21600
Beban lajur "D"	TD	1.8	37461,6	67430,88
Beban rem	TB	1.8	3470	6246
Beban angin	EW	1	5256	5256
Beban gempa	EQ	1	23515	23515
Total Momen Ultimit yang bekerja				422350,578
<b>Muk &gt; Mn</b>	566883,661	>	422350,578	

### 5.2.8 Lentutan Pada *Box Girder*

Lentutan pada balok prategang tergantung dari kombinasi gaya prategang, beban luar dan lama pembebanan. Gaya prategang akan menimbulkan lentutan ke atas (*chamber*), sedangkan beban luar akan menimbulkan lentutan ke bawah. Kontrol lentutan dilakukan pada saat transfer dan pada saat servis. Pada saat transfer dimana beban berat sendiri yang bekerja terjadi lentutan keatas yang disebabkan oleh tekanan tendon ke atas pada waktu penarikan kabel prategang.

Untuk lentutan ke atas akibat gaya prategang pada *simple beam* dihitung dengan rumus:

$$\delta_c = \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)}$$

Untuk lentutan dengan beban merata dapat dihitung dengan rumus:

$$\delta_D = \frac{5}{384} \cdot \frac{w \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)}$$

Berikut merupakan perhitungan lentutan pada penampang *box girder* trapesium dan persegi.

### 1. Lendutan Penampang Trapesium

Lendutan saat transfer :

$$\text{Jarak titik berat terhadap titik berat box } (e_s) = 1,401 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia penampang } (I_x) = 13,553 \text{ m}^4$$

$$\text{Gaya prategang awal } (P_0) = 165115,092 \text{ kN}$$

$$\text{Panjang bentang } (L) = 80 \text{ m}$$

$$\text{Modulus elastisitas beton prategang } (E_c) = 33234,02 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Chamber } (\delta_c) &= \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \\ &= -0,342 \text{ m (keatas)} \end{aligned}$$

$$\text{Berat sendiri box } (Q_{MS}) = 225,848 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \text{Defleksi } (\delta_d) &= \frac{5}{384} \cdot \frac{w \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \\ &= 0,267 \text{ m (kebawah)} \end{aligned}$$

$$\text{Total lendutan } (\delta_{total}) = -0,075 \text{ m (keatas)}$$

Lendutan keadaan layan :

$$\text{Gaya prategang efektif } (P_{eff}) = 146578,024 \text{ kN}$$

$$\text{Chamber } (\delta_c) = -0,304 \text{ m (keatas)}$$

Lendutan akibat beban pada penampang trapesium dapat dilihat pada **Tabel 5.23**.

**Tabel 5.27 Lendutan Akibat Beban Penampang Trapesium**

Lendutan akibat beban					
Beban	Kode	Q	P	Momen	Defleksi
Berat mati sendiri	MS	225,848		180678,784	0,2674
Berat mati tambahan	MA	40,993		32794	0,0485
Beban pejalan kaki	TP	15		12000	0,0178
Beban lajur "D"	TD	37,125	388,08	37461,6	0,0531
Beban rem	TB	173,5		3470	0,0032
Beban angin	EW	6,57		5256	0,0078
Beban gempa	EQ	26,684		21347,278	0,0316

REKAPITULASI LENDUTAN TRAPESIUM			
Jenis beban	Kode	Lendutan	Keterangan
<i>Chamber</i>	PR	-0,304	CHAMBER
Berat mati sendiri	MS	0,267	DEFLEKSI
Berat mati tambahan	MA	0,049	DEFLEKSI
Beban pejalan kaki	TP	0,018	DEFLEKSI
Beban lajur "D"	TD	0,053	DEFLEKSI
Beban rem	TB	0,003	DEFLEKSI
Beban angin	EW	0,008	DEFLEKSI
Beban gempa	EQ	0,032	DEFLEKSI
TOTAL LENDUTAN		0,135	

## 2. Lendutan Penampang Persegi

Lendutan saat transfer :

$$\text{Jarak titik berat terhadap titik berat box } (e_s) = 1,338 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia penampang } (I_x) = 15,063 \text{ m}^4$$

$$\text{Gaya prategang awal } (P_0) = 192565,719 \text{ kN}$$

$$\text{Panjang bentang } (L) = 80 \text{ m}$$

$$\text{Modulus elastisitas beton prategang } (E_c) = 33234,02 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Chamber } (\delta_c) &= \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \\ &= -0,343 \text{ m (keatas)} \end{aligned}$$

$$\text{Berat sendiri box } (Q_{MS}) = 225,042 \text{ kNm}$$

$$\begin{aligned} \text{Defleksi } (\delta_d) &= \frac{5}{384} \cdot \frac{w \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \\ &= 0,272 \text{ m (kebawah)} \end{aligned}$$

$$\text{Total lendutan } (\delta_{total}) = -0,071 \text{ m (keatas)}$$

Lendutan keadaan layan :

$$\text{Gaya prategang efektif } (P_{eff}) = 167435,520 \text{ kN}$$

$$\text{Chamber } (\delta_c) = -0,298 \text{ m (keatas)}$$

**Tabel 5.28 Lendutan Akibat Beban Penampang Trapesium**

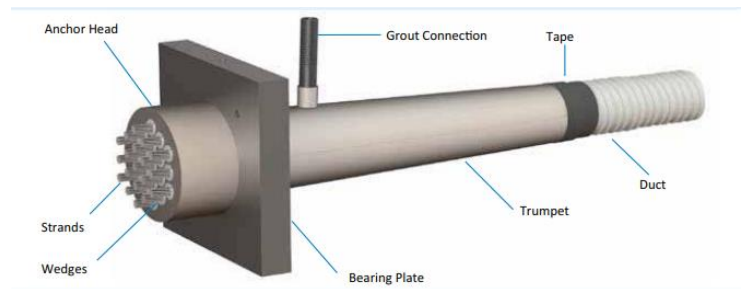
Lendutan akibat beban					
Beban	Kode	Q	P	Momen	defleksi
Berat mati sendiri	MS	255,024		204019,2	0,2713
Berat mati tambahan	MA	40,993		32794	0,0440
Beban pejalan kaki	TP	15		12000	0,0161
Beban lajur "D"	TD	37,125	388,08	37461,6	0,0481
Beban rem	TB	173,5		3470	0,0029
Beban angin	EW	6,57		5256	0,0070
Beban gempa	EQ	29,602		23681,32	0,0315

REKAPITULASI LENDUTAN			
Jenis beban	Kode	Lendutan	Keterangan
Chamber	PR	-0,300	CHAMBER
Berat mati sendiri	MS	0,271	DEFLEKSI
Berat mati tambahan	MA	0,044	DEFLEKSI
Beban pejalan kaki	TP	0,016	DEFLEKSI
Beban lajur "D"	TD	0,048	DEFLEKSI
Beban rem	TB	0,003	DEFLEKSI
Beban angin	EW	0,007	DEFLEKSI
Beban gempa	EQ	0,032	DEFLEKSI
TOTAL LENDUTAN		0,129	

### 5.2.9 Perhitungan Angkur (*End Block*)

Angkur yang digunakan menggunakan VSL *Anchorage Type E* 0,5 dapat dilihat pada **Gambar 5.26** berikut.





**Gambar 5.25 VSL Anchorage Type E 0.5**

## 2. Perhitungan Angkur Penampang Trapesium

Jumlah strand 1 tendon ( $n_s$ ) = 32 strands

Beban putus 1 strands ( $P_{bs}$ ) = 260,65 kN

Beban putus 1 tendon ( $P_{b1}$ ) = 8340,8 kN

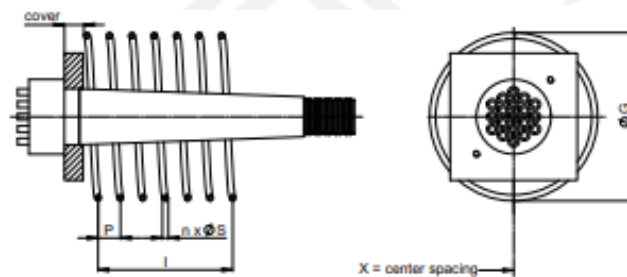
lebar angkur ( $a$ ) = 370 mm

Tinggi box ( $H$ ) = 3,3 m

Gaya tarik angkur ( $T$ ) =  $0,25 P_{bs} (1 tendon) \left(1 - \frac{a}{h}\right)$   
 =  $0,25 \cdot 8340,8 \left(1 - \frac{0,370}{3,3}\right)$   
 = 1851404,848 kN

Mutu baja ( $f_y$ ) = 460 MPa

Tegangan izin baja angkur =  $0,6 \cdot f_y$   
 =  $0,6 \cdot 460$   
 = 276 MPa



**Gambar 5.26 Penulangan Anchorage Type E 0.5**

Luas tulangan yang diperlukan :

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{T}{0,6 f_y} \\ &= \frac{1851404,848}{276} \\ &= 6707,99 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Diameter tulangan yang digunakan} &= 25 \text{ mm} \\
 \text{Luas satu tulangan (A1d)} &= 981,748 \text{ mm}^2 \\
 \text{Tulangan angkur yang diperlukan} &= A_s / A_{1d} \\
 &= 6707,99 / 981,748 \\
 &= 6,833 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah tulangan yang digunakan} = 8 \text{ buah}$$

### 3. Perhitungan Angkur Penampang Persegi

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah strand 1 tendon (n}_s) &= 40 \text{ strands} \\
 \text{Beban putus 1 strands (P}_{bs}) &= 260,65 \text{ kN} \\
 \text{Beban putus 1 tendon (P}_{b1}) &= 10426 \text{ kN} \\
 \text{lebar angkur (a)} &= 390 \text{ mm} \\
 \text{Tinggi box (H)} &= 3,3 \text{ m} \\
 \text{Gaya tarik angkur (T)} &= 0,25 P_{bs \text{ (1 tendon)}} \left(1 - \frac{a}{h}\right) \\
 &= 0,25 \cdot 10426 \left(1 - \frac{0,390}{3,3}\right) \\
 &= 2298459,091 \text{ kN} \\
 \text{Mutu baja (f}_y) &= 460 \text{ MPa} \\
 \text{Tegangan izin baja angkur} &= 0,6 \cdot f_y \\
 &= 0,6 \cdot 460 \\
 &= 276 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Luas tulangan yang diperlukan :

$$\begin{aligned}
 A_s &= \frac{T}{0,6 f_y} \\
 &= \frac{2298459,091}{276} \\
 &= 8327,75 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Diameter tulangan yang digunakan} &= 25 \text{ mm} \\
 \text{Luas satu tulangan (A1d)} &= 981,748 \text{ mm}^2 \\
 \text{Tulangan angkur yang diperlukan} &= A_s / A_{1d} \\
 &= 8327,75 / 981,748 \\
 &= 8,483 \text{ buah} \\
 \text{Jumlah tulangan yang digunakan} &= 10 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

### 5.2.10 Penulangan *Box Girder*

Berikut merupakan desai tulangan pada penampang trapesium.

#### 3. Desain Geser Balok Penampang Trapesium

**Tabel 5.29 Rekapitulasi Pembebanan Penampang Trapesium**

Rekapitulasi Pembebanan	Kode	Q (kN/m)	P (kN)	V (kN)
Berat mati sendiri	MS	255,024	0	10200,96
Berat mati tambahan	MA	40,993	0	1639,7
Beban pejalan kaki	TP	15	0	600
Beban lajur "D"	TD	37,125	388,08	1679,04
Beban rem	TB	173,5	0	86,75
Beban angin	EW	6,57	0	262,8
Beban gempa	EQ	29,602	0	1184,066

**Tabel 5.30 Kombinasi Pembebanan Trapesium**

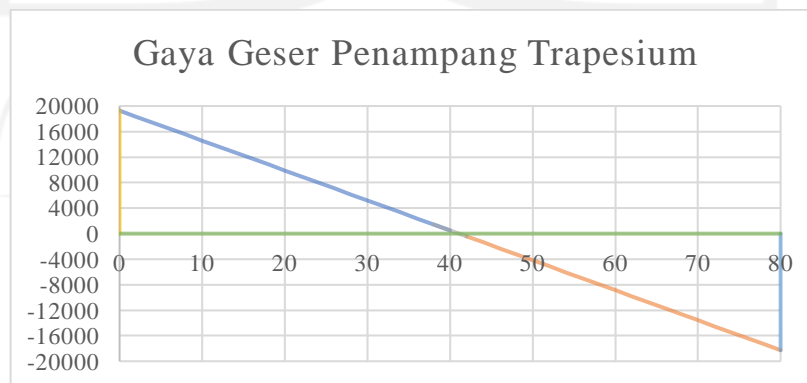
Kombinasi pembebanan	Kode	Kuat 1	Kuat 2	Kuat 3	Kuat 4	Kuat 5	Ekstrim 1
Beban mati sendiri	MS	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Beban mati tambahan	MA	2	2	2	2	2	2
Beban lajur D	TD	1,8	1,4	0	0	0	0,5
Beban rem	TB	1,8	1,4	0	0	0	0,5
Beban pejalan kaki	TP	1,8	1,4	0	0	0	0,5
Beban angin	EW	0	0	0	0	1	0
Beban gempa	EQ	0	0	0	0	0	0

**Tabel 5.31 Hasil Kombinasi Pembebanan Trapesium**

Jarak x (m)	Kombinasi Pembebanan					
	Kuat 1	Kuat 2	Kuat 3	Kuat 4	Kuat 5	Ekstrim 1
0	20799,07	19852,75	16540,65	16540,65	16803,45	17723,54
2	19784,39	18879,77	15713,62	15713,62	15963,28	16844,39
4	18769,71	17906,79	14886,58	14886,58	15123,10	15965,23
6	17755,02	16933,81	14059,55	14059,55	14282,93	15086,07
8	16740,34	15960,82	13232,52	13232,52	13442,76	14206,91

Jarak x (m)	Kombinasi Pembebanan					
	Kuat 1	Kuat 2	Kuat 3	Kuat 4	Kuat 5	Ekstrim 1
10	15725,66	14987,84	12405,49	12405,49	12602,59	13327,76
12	14710,98	14014,86	11578,45	11578,45	11762,41	12448,60
14	13696,29	13041,88	10751,42	10751,42	10922,24	11569,44
16	12681,61	12068,89	9924,39	9924,39	10082,07	10690,28
18	11666,93	11095,91	9097,36	9097,36	9241,90	9811,13
20	10652,25	10122,93	8270,32	8270,32	8401,72	8931,97
22	9637,56	9149,95	7443,29	7443,29	7561,55	8052,81
24	8622,88	8176,97	6616,26	6616,26	6721,38	7173,65
26	7608,20	7203,98	5789,23	5789,23	5881,21	6294,50
28	6593,52	6231,00	4962,19	4962,19	5041,03	5415,34
30	5578,83	5258,02	4135,16	4135,16	4200,86	4536,18
32	4564,15	4285,04	3308,13	3308,13	3360,69	3657,02
34	3549,47	3312,05	2481,10	2481,10	2520,52	2777,87
36	2534,79	2339,07	1654,06	1654,06	1680,34	1898,71
38	1520,10	1366,09	827,03	827,03	840,17	1019,55
40	505,42	393,11	0,00	0,00	0,00	140,39

Grafik gaya geser penampang trapesium dapat dilihat pada **Gambar 5.28** berikut ini.



**Gambar 5.27 Grafik Gaya Geser Penampang Trapesium**

## 2. Desain Tulangan Balok Prategang

Kuat tekan beton prategang ( $f'_c$ ) = 50 Mpa

Luas penampang (A)	= 9,777 m <sup>2</sup>
Lebar balok menahan geser (bw)	= 1,5 m
Selimit beton (Sb)	= 0,04 m
Diameter tulangan (D)	= 19 mm
Tinggi balok (h)	= 3,3 m
Tinggi efektif penampang balok (d)	= 3250,5 mm
Faktor reduksi (Ø)	= 0,7
Gaya geser maks (Vu)	= 19281,943 kN
Gaya prategang efektif (Pe = Nu)	= 146578,02 kN
Kuat geser maksimum :	
Vs maks	= 22984,506 kN
Vs	= 21799,506 kN
Vs min	= 11492,253 kN
Syarat : Vu < Vs maks	
19281,943 < 22984,5	Ok
Kuat beton menahan geser :	
Vc	= 5746,126 kN
ØVc	= 4022,289 kN
0.5*ØVc	= 2011,144 kN

### 3. Tulangan Sengkang

Diameter sengkang (ds)	= 25 mm
Jumlah kaki (n)	= 6 buah
Luasan sengkang (Av)	= 2945,243 mm <sup>2</sup>
Mutu baja tulangan (fy)	= 400 MPa

#### a. Daerah Vu > ØVc

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_u - \text{Ø}V_c \\
 &= 19281 - 4022,289 \\
 &= 15259,654 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak antar tulangan (s)} &= \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s} \\
 &= 250,949 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Jarak antar tulangan ( $s$  pakai) = 200 mm

- b. Daerah  $0,5\phi V_c < V_u < \phi V_c$   
dipakai sengkang minimum

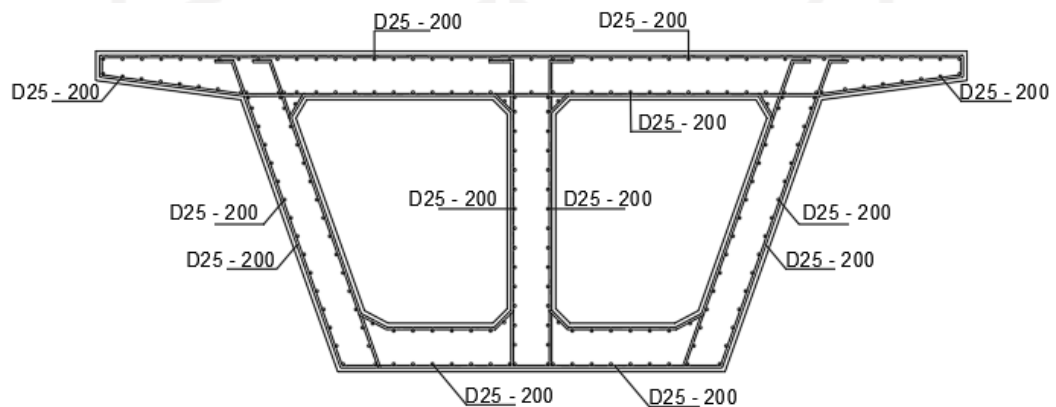
$$S = d/2 \\ = 1625,25 \text{ mm}$$

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

dipakai  $S = 600 \text{ mm}$

- c. Daerah  $V_u < 0,5\phi V_c$

Jarak sengkang dipakai ( $S$ ) = 600 mm



**Gambar 5.28 Tulangan Penampang Trapesium**

Berikut merupakan desain tulangan pada penampang persegi.

1. Desain Geser Balok Penampang Persegi.

**Tabel 5.32 Rekapitulasi Pembebanan Penampang Persegi**

Rekapitulasi Pembebanan	Kode	Q (kN/m)	P (kN)	V (kN)
Berat mati sendiri	MS	252,945	0	10117,800
Berat mati tambahan	MA	40,993	0	1639,7
Beban pejalan kaki	TP	15	0	600
Beban lajur "D"	TD	37,125	388,08	1679,04
Beban rem	TB	173,5	0	86,75
Beban angin	EW	6,57	0	262,8
Beban gempa	EQ	29,394	0	1175,750

**Tabel 5.33 Kombinasi Pembebanan Persegi**

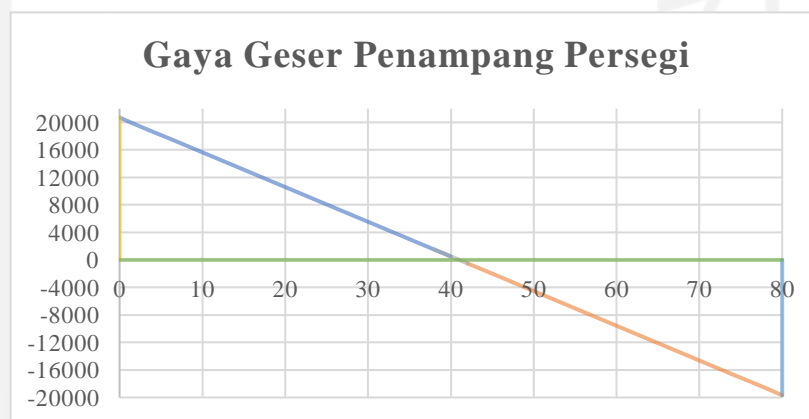
Kombinasi pembebanan	Kode	Kuat 1	Kuat 2	Kuat 3	Kuat 4	Kuat 5	Ekstrim 1
Beban mati sendiri	MS	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3
Beban mati tambahan	MA	2	2	2	2	2	2
Beban lajur D	TD	1,8	1,4	0	0	0	0,5
Beban rem	TB	1,8	1,4	0	0	0	0,5
Beban pejalan kaki	TP	1,8	1,4	0	0	0	0,5
Beban angin	EW	0	0	0	0	1	0
Beban gempa	EQ	0	0	0	0	0	0

**Tabel 5.33 Hasil Kombinasi Pembebanan Persegi**

Jarak x (m)	Kombinasi Pembebanan					
	Kuat 1	Kuat 2	Kuat 3	Kuat 4	Kuat 5	Ekstrim 1
0	20690,96	19744,65	16432,54	16432,54	16695,34	17615,44
2	19681,69	18777,07	15610,91	15610,91	15860,57	16741,68
4	18672,41	17809,49	14789,29	14789,29	15025,81	15867,93
6	17663,13	16841,92	13967,66	13967,66	14191,04	14994,18
8	16653,85	15874,34	13146,03	13146,03	13356,27	14120,43
10	15644,58	14906,76	12324,41	12324,41	12521,51	13246,68
12	14635,30	13939,18	11502,78	11502,78	11686,74	12372,92
14	13626,02	12971,61	10681,15	10681,15	10851,97	11499,17
16	12616,75	12004,03	9859,52	9859,52	10017,20	10625,42
18	11607,47	11036,45	9037,90	9037,90	9182,44	9751,67
20	10598,19	10068,88	8216,27	8216,27	8347,67	8877,92
22	9588,92	9101,30	7394,64	7394,64	7512,90	8004,16
24	8579,64	8133,72	6573,02	6573,02	6678,14	7130,41
26	7570,36	7166,15	5751,39	5751,39	5843,37	6256,66
28	6561,08	6198,57	4929,76	4929,76	5008,60	5382,91
30	5551,81	5230,99	4108,14	4108,14	4173,84	4509,16
32	4542,53	4263,41	3286,51	3286,51	3339,07	3635,40

Jarak x (m)	Kombinasi Pembebanan					
	Kuat 1	Kuat 2	Kuat 3	Kuat 4	Kuat 5	Ekstrim 1
34	3533,25	3295,84	2464,88	2464,88	2504,30	2761,65
36	2523,98	2328,26	1643,25	1643,25	1669,53	1887,90
38	1514,70	1360,68	821,63	821,63	834,77	1014,15
40	505,42	393,11	0,00	0,00	0,00	140,39

Grafik gaya geser penampang persegi dapat dilihat pada **Gambar 5.29** berikut ini.



**Gambar 5.29 Grafik Gaya Geser Penampang Trapesium**

## 2. Desain Tulangan Balok Prategang

Kuat tekan beton prategang ( $f'_c$ )	= 50 Mpa
Luas penampang (A)	= 11,040 m <sup>2</sup>
Lebar balok menahan geser ( $b_w$ )	= 1,5 m
Selimit beton ( $S_b$ )	= 0,04 m
Diameter tulangan (D)	= 19 mm
Tinggi balok (h)	= 3,3 m
Tinggi efektif penampang balok (d)	= 3250,5 mm
Faktor reduksi ( $\phi$ )	= 0,7
Gaya geser maks ( $V_u$ )	= 20799,070 kN
Gaya prategang efektif ( $P_e = N_u$ )	= 167435,598 kN
Kuat geser maksimum :	
$V_s$ maks	= 22984,506 kN



$$V_s = 23966,831 \text{ kN}$$

$$V_{s \text{ min}} = 11492,253 \text{ kN}$$

Syarat :  $V_u < V_{s \text{ maks}}$

$$20799,070 < 22984,5 \quad \text{Ok}$$

Kuat beton menahan geser :

$$V_c = 5746,126 \text{ kN}$$

$$\phi V_c = 4022,289 \text{ kN}$$

$$0.5 \cdot \phi V_c = 2011,144 \text{ kN}$$

### 3. Tulangan Sengkang

$$\text{Diameter sengkang (ds)} = 25 \text{ mm}$$

$$\text{Jumlah kaki (n)} = 6 \text{ buah}$$

$$\text{Luasan sengkang (Av)} = 2945,243 \text{ mm}^2$$

$$\text{Mutu baja tulangan (fy)} = 400 \text{ MPa}$$

#### a. Daerah $V_u > \phi V_c$

$$\begin{aligned} V_s &= V_u - \phi V_c \\ &= 20799,070 - 4022,289 \\ &= 16776,781 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak antar tulangan (s)} &= \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{V_s} \\ &= 228,25624 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Jarak antar tulangan (s pakai)} = 200 \text{ mm}$$

#### b. Daerah $0,5\phi V_c < V_u < \phi V_c$ dipakai sengkang minimum

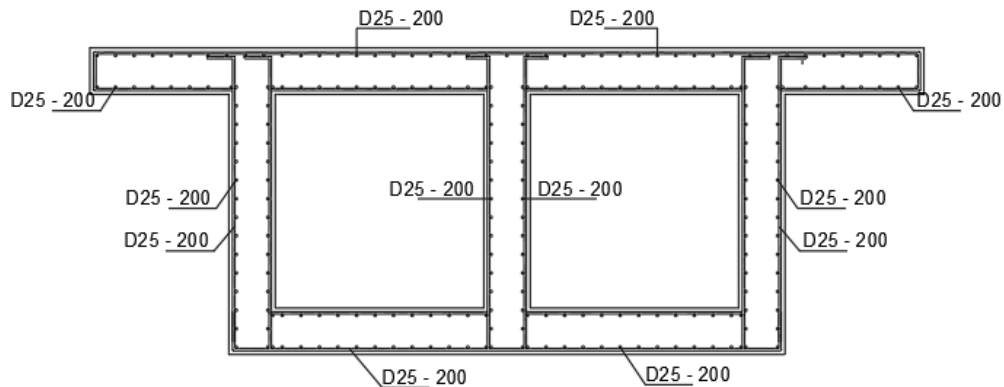
$$\begin{aligned} S &= d/2 \\ &= 1625,25 \text{ mm} \end{aligned}$$

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

$$\text{dipakai } S = 600 \text{ mm}$$

#### c. Daerah $V_u < 0,5\phi V_c$

$$\text{Jarak sengkang dipakai (S)} = 600 \text{ mm}$$



**Gambar 5.30 Tulangan Penampang Persegi**

### 5.3 Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis perbandingan penampang trapesium dan persegi pada *box girder*, maka diperoleh hasil berikut ini.

#### 5.3.1 Dimensi Penampang dan Tendon Prategang

Dimensi penampang *box girder* trapesium dan persegi memiliki lebar gelagar, tinggi gelagar dan ketebalan gelagar yang sama. Gelagar *box girder* Jembatan Grembyangan memiliki lebar 9 meter, tinggi gelagar 3,3 meter dan tebal gelagar 0,6 meter. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, penampang *box girder* trapesium memiliki luas penampang sebesar  $9,777 \text{ m}^2$  dan penampang *box girder* persegi sebesar  $11,040 \text{ m}^2$ . Luas masing – masing penampang dipengaruhi oleh perbedaan bentuk penampang. Luas penampang *box girder* trapesium lebih kecil dibandingkan dengan luas penampang *box girder* persegi. Selain itu, bentuk penampang juga mempengaruhi jarak titik berat penampang dan momen inersia penampang. Jarak titik berat penampang terhadap alas *box girder* trapesium sebesar 1,903 meter dan momen inersia penampang sebesar  $48,960 \text{ m}^4$ . Sedangkan jarak titik berat penampang terhadap alas *box girder* persegi sebesar 1,840 meter dan momen inersia penampang sebesar  $52,449 \text{ m}^4$ .

Berdasarkan analisis yang dilakukan pada penampang *box girder* trapesium dan persegi terdapat perbedaan eksentrisitas tendon prategang pada kedua penampang dengan tinjauan kondisi jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* ( $z_0$ ) sebesar 0,502 meter. Penampang trapesium memiliki nilai eksentrisitas ( $e_s$ ) sebesar 1,401 meter dan penampang persegi memiliki nilai

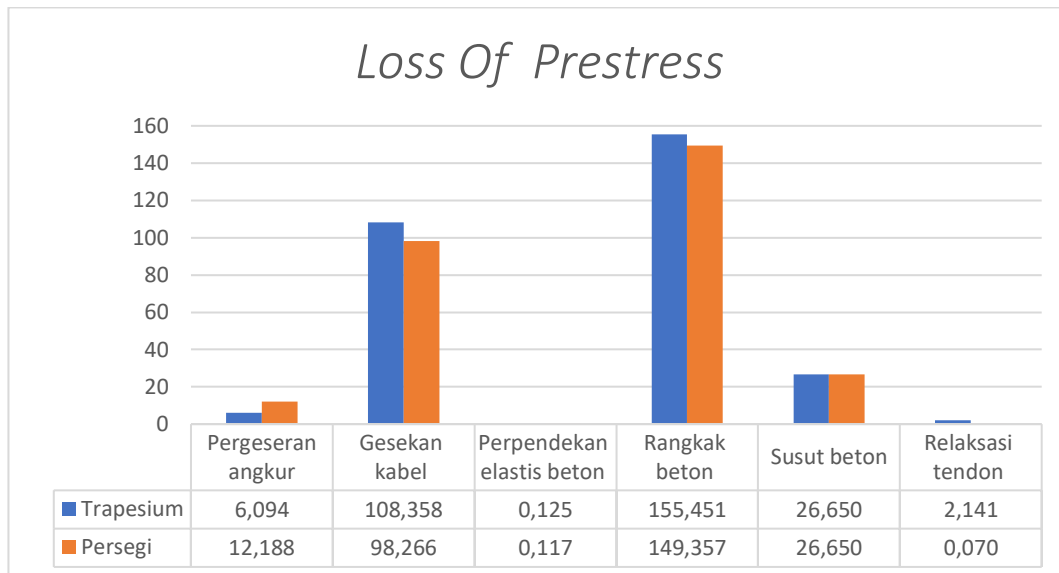
eksentrisitas ( $e_s$ ) sebesar 1,338 meter. Perbedaan eksentrisitas dipengaruhi oleh letak titik berat masing – masing penampang *box girder*. Penampang *box girder* trapesium memiliki jarak titik berat dari alas ( $y_b$ ) sebesar 1,903 meter, sedangkan pada penampang *box girder* persegi jarak titik berat dari alas ( $y_b$ ) sebesar 1,840 meter. Letak titik berat dari alas penampang *box girder* trapesium lebih tinggi dari penampang *box girder* persegi.

Perbedaan eksentrisitas tendon juga mempengaruhi gaya prategang awal ( $P_0$ ). Gaya prategang awal ( $P_0$ ) penampang *box girder* trapesium sebesar 165115,092 kN sedangkan gaya prategang awal ( $P_0$ ) penampang *box girder* persegi sebesar 192565,912 kN. Hal tersebut menyebabkan adanya perbedaan jumlah *strands* pada satu tendon dengan acuan masing – masing penampang memiliki jumlah tendon yang sama, yaitu 30 tendon. Penampang trapesium membutuhkan 32 *strands* pada satu tendon dengan jumlah seluruh strands sebanyak 960 *strands*, sedangkan pada penampang persegi membutuhkan 40 *strands* dalam satu tendon dengan jumlah seluruh *strands* sebanyak 1200 *strands*.

Perubahan eksentrisitas pada saat menentukan tata letak tendon terjadi pada penampang *box girder* persegi. Perubahan eksentrisitas terjadi akibat jarak susunan tendon pada daerah tumpuan. Nilai eksentrisitas tendon awal sebesar 1,338 meter ditinjau dari bagian bawah penampang *box girder*. Namun pada saat menentukan tata letak tendon, nilai eksentrisitas tendon menjadi 0,99 meter. Terdapat selisih sebesar 0,348 meter nilai eksentrisitasnya. Daerah aman tendon batas atas ( $e_a$ ) sejauh 1,039 meter dan batas bawah ( $e_b$ ) sebesar 2,079 meter. Jika dilihat dari daerah aman tendon, maka nilai eksentrisitas pada penampang *box girder* tidak aman karena melebihi batas daerah aman tendon.

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

Kehilangan prategang (*Loss Of Prestress*) dapat dipengaruhi oleh tendon yang terdapat pada *box girder*. Grafik yang dihasilkan dari perbandingan *box girder* penampang trapesium dan penampang persegi dapat dilihat pada **Gambar 5.32** berikut ini.



**Gambar 5.31 Grafik Kehilangan Prategang (*Loss Of Prestress*)**

Kehilangan prategang akibat pergeseran ankur pada penampang *box girder* trapesium sebesar 6,094 MPa lebih kecil daripada penampang *box girder* persegi sebesar 12,188 MPa. Nilai kehilangan akibat pergeseran ankur dipengaruhi oleh adanya blok – blok anker pada saat gaya pendongkrak ditransfer ke ankur.

Besarnya kehilangan akibat gesekan antara tendon dan beton disekitarnya merupakan fungsi dari alinyemen tendon yang disebut efek kelengkungan dan deviasi lokal di dalam alinyemen tendon disebut efek *Wobble*. Saat tendon ditarik dengan gaya  $F$  diujung pendongkrakan, tendon mengalami gesekan dengan saluran di sekitarnya sedemikian hingga tegangan ditendon akan bervariasi dari bidang pendongkrakan ke jarak  $L$  di sepanjang bentang. Nilai kehilangan prategang akibat gesekan kabel pada penampang *box girder* trapesium lebih besar sebesar 108,358 MPa daripada penampang *box girder* persegi sebesar 98,266 MPa. Perbedaan nilai kehilangan akibat gesekan tersebut disebabkan oleh nilai  $\alpha$  masing – masing *box girder*. Karena rasio tinggi balok terhadap bentangnya kecil, maka panjang proyeksi tendon dapat digunakan untuk menghitung  $\alpha$  dengan asumsi kelengkungan tendon sesuai dengan busur lingkaran, maka sudut pusat  $\alpha$  di sepanjang segmen yang melengkung besarnya dua kali kemiringan di ujung segmen.

Pemendekan elastisitas beton terjadi akibat adanya gaya prategang yang bekerja pada beton. Tendon yang melekat pada beton secara simultan juga

memendek, maka tendon akan kehilangan Sebagian gaya prategang yang dipikulnya. Nilai kehilangan prategang pada penampang *box girder* trapesium sebesar 0,125 MPa dan pada penampang *box girder* persegi sebesar 0,117 MPa. Nilai pada penampang *box girder* persegi lebih besar daripada *box girder* trapesium. Hal tersebut dipengaruhi oleh nilai gaya prategang yang terjadi pada beton masing – masing penampang berbeda, namun nilai modulus ratio (n) dari perbandingan antara modulus elastis beton dan modulus elastis baja prategang yang digunakan sama. Sehingga nilai tegangan yang bekerja pada masing – masing penampang juga berbeda.

Tegangan rangkai dan kehilangan tegangan hanya terjadi akibat beban yang terus menerus selama riwayat pembebanan suatu elemen struktural. Kehilangan prategang akibat rangkai yang terbesar diperoleh 155,451 MPa pada penampang *box girder* trapesium dibandingkan dengan penampang *box girder* persegi. Kehilangan prategang akibat rangkai pada struktur *nonbonded* dapat dipandang seragam di sepanjang bentangnya. Maka nilai rata – rata untuk tegangan beton saat transfer diantara titik – titik angkur dapat digunakan untuk menghitung rangkai pada struktur pascatarik. Nilai tegangan beton pada saat transfer dipengaruhi oleh berat sendiri penampang *box girder*. Penampang *box girder* memiliki berat sendiri lebih besar dibandingkan penampang *box girder* trapesium. Selain itu, nilai beban tambahan yang bekerja di masing – masing penampang juga ada yang berbeda, yaitu beban gempa yang dipengaruhi oleh berat sendiri masing – masing penampang *box girder*. Hal ini menyebabkan perbedaan nilai tegangan pada beton saat kondisi transfer.

Untuk kondisi susut, *Prestressed Concrete Institute* menetapkan nilai rata – rata untuk regangan susut ultimit nominal  $(\epsilon_{SH})_U = 820 \times 10^{-6}$  in/in. beberapa faktor yang mempengaruhi susut meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, waktu perawatan maupun lingkungan. Hasil dari analisis yang dilakukan, kehilangan prategang akibat susut yang digunakan mengacu pada metode perawatan basah. Nilai kehilangan prategang akibat susut pada kedua penampang sama sebesar 26,650 MPa karena waktu perawatan yang digunakan sama selama 7 hari untuk

metode perawatan basah. Untuk komponen pascatarik, kehilangan prategang akibat susut lebih kecil karena Sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pascatarik.

Tendon *stress-relieved* mengalami kehilangan pada gaya prategang sebagai akibat dari perpanjangan konstan terhadap waktu. Besar pengurangan prategang bergantung tidak hanya pada durasi gaya prategang yang ditahan, melainkan juga pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang ( $f_{pi}/f_{py}$ ). Nilai kehilangan prategang pada penampang *box girder* trapesium sebesar 2,141 MPa dan pada penampang *box girder* persegi sebesar 0,070 MPa.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, kehilangan pada penampang trapesium sebesar 298,819 MPa (26,94%) dengan gaya prategang efektif sebesar 143968,673 kN. Penampang persegi kehilangan gaya prategang sebesar 286,648 MPa (27,70%) dengan gaya prategang efektif sebesar 163801,602 kN.

**Tabel 5.34 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang**

Kehilangan Gaya Prategang		Trapeسيوم		Persegi	
No	Level tegangan	Tegangan Baja (MPa)	Persen (%)	Tegangan Baja (MPa)	Persen (%)
		Setelah Penegangan	1109,269	100%	1034,949
<b>Kehilangan tegangan</b>					
1	Pergeseran ankur	6,094	0,55%	12,188	1,18%
2	Gesekan kabel	108,358	9,77%	98,266	9,49%
3	Perpendekan elastis beton	0,125	0,01%	0,117	0,01%
4	Rangkak beton	155,451	14,01%	149,357	14,43%
5	Susut beton	26,650	2,40%	26,650	2,58%
6	Relaksasi tendon	2,141	0,19%	0,070	0,01%
Tegangan akhir efektif		810,450	73,06%	748,302	72,30%
Kehilangan tegangan total		298,819	26,94%	286,648	27,70%
<b>Gaya efektif di tengah bentang</b>					
Prategang efektif ( $P_{eff}$ )		143968,673	kN	163801,602	kN

### 5.3.3 Lendutan

Analisis lendutan yang dihitung merupakan lendutan seketika. Perhitungan lendutan dilakukan dengan menghitung lendutan akibat beban – beban yang bekerja pada gelagar *box girder*. Selain itu, perhitungan lendutan keatas (*chamber*) juga dilakukan. Lendutan yang terjadi pada penampang trapesium sebesar 0,125 meter kebawah, sedangkan pada penampang persegi sebesar 0,205 meter kebawah. Nilai *chamber* pada penampang trapesium sebesar – 0,294 meter keatas dan pada penampang persegi sebesar – 0,216 meter keatas. Lendutan terbesar terjadi pada penampang *box girder* persegi dengan selisih 0,078 meter dari lendutan penampang *box girder* trapesium. Batas lendutan ijin untuk *box girder* berdasarkan RSNI T – 12 – 2004 yaitu  $L/250$  atau sebesar 0,32 meter kebawah. Dari hasil hitungan analisis lendutan seketika pada gelagar Jembatan Grembyangan, gelagar *box girder* penampang trapesium dan penampang persegi masih memenuhi syarat karena lendutan yang terjadi masih dibawah batas ijin yang ditentukan.

**Tabel 5.35 Rekapitulasi Chamber dan Lendutan Box Girder**

REKAPITULASI LENDUTAN		Trapesium	Persegi	Keterangan
Jenis beban	Kode	Lendutan	Lendutan	
Chamber	PR	-0,294	-0,216	CHAMBER
Berat mati sendiri	MS	0,267	0,272	DEFLEKSI
Berat mati tambahan	MA	0,049	0,044	DEFLEKSI
Beban pejalan kaki	TP	0,018	0,016	DEFLEKSI
Beban lajur "D"	TD	0,053	0,048	DEFLEKSI
Beban rem	TB	0,003	0,003	DEFLEKSI
Beban angin	EW	0,008	0,007	DEFLEKSI
Beban gempa	EQ	0,032	0,032	DEFLEKSI
TOTAL LENDUTAN		0,135	0,205	



## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan dan perbandingan struktur atas gelagar prategang penampang trapesium dan persegi dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Struktur atas gelagar prategang dengan penampang *box girder* trapesium aman terhadap tegangan, beban – beban yang bekerja dan lendutan yang terjadi. Hasil yang diperoleh berupa luas penampang  $9,777 \text{ m}^2$ , jumlah tendon 30 buah, jumlah *strands* 32 buah/tendon, total *strands* 960 buah, kehilangan gaya prategang sebesar 26,94 %.
2. Struktur atas gelagar prategang dengan penampang *box girder* persegi aman terhadap tegangan, beban – beban yang bekerja dan lendutan yang terjadi. Hasil yang diperoleh berupa luas penampang  $11,040 \text{ m}^2$ , jumlah tendon 30 buah, jumlah *strands* 40 buah/tendon, total *strands* 1200 buah, kehilangan gaya prategang sebesar 27,70 %.
3. Terdapat perubahan nilai eksentrisitas pada penampang *box girder* trapesium dari jarak 1,338 meter menjadi 0,99 meter. Perubahan jarak eksentrisitas tersebut melewati batas daerah aman tendon.
4. Lendutan seketika yang terjadi pada penampang *box girder* trapesium sebesar 0,135 meter dan *box girder* persegi sebesar 0,205 meter masih dalam batas aman karena kurang dari batas lendutan ijin  $L/250$  atau sebesar 0,32 meter.
5. Desain penampang trapesium sebagai gelagar prategang untuk Jembatan Grembyangan lebih aman digunakan pada bentang 80 meter.

#### 6.2 Saran

Berdasarkan hasil dari simpulan di atas, maka dapat diusulkan saran, yaitu perlu adanya perbandingan secara menyeluruh meliputi struktur atas dengan penampang yang lainnya, struktur bawah, Rencana Anggaran Biaya (RAB), dan juga perhitungan pada volume struktur atas gelagar.



## DAFTAR PUSTAKA

- Chen, W. dan Duan, L. 2014. *Bridge Engineering Handbook, Second Edition: Superstructure Design*. CRC Press. London.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2021. Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan. Direktorat Jenderal Bina Marga. Jakarta.
- Faradiba, K. 2017. Studi Perbandingan Desain Struktur Atas Jembatan Siak I Menggunakan *Prestressed Concrete Box Girder Prismatic* Dan *Non-Prismatic*. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia.
- Firmansyah, F. 2019. Analisis Struktur Jembatan Cisomang dengan Menggunakan *Single Box Girder* dan *Multibox Girder*. Tugas Akhir. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia.
- Nawy, Edward G. 2001. *Beton Prategang: Suatu Pendekatan Mendasar/Edward G. Nawy*. Terjemahan oleh Bambang Suryoatmono. 2001. Erlangga. Jakarta.
- Raju, Krishna. 1981. *Beton Prategang: Edisi Kedua*. Erlangga. Jakarta.
- Rancangan Standar Nasional Indonesia. 2004. *Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan (RSNI – T – 12 – 2004)*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Supriyadi, B, dan Muntohar, A. S. 2007. Jembatan. UGM Press. Yogyakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2016. *Pembebanan ton untuk Jembatan (SNI 1725:2016)*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Standar Nasional Indonesia. 2016. *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa (SNI 2833:2016)*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.
- Tumpu, M, dan Rangan, P. 2020. *Struktur Beton Prategang: Teori dan Prinsip Dasar*. ResearchGate. Makasar.
- Wafi, H. 2018. Tugas Akhir. Desain Jembatan Menggunakan Beton Prategang Bentuk *Box Girder Tipe Single Twin Cellular* Berdasarkan Pembebanan Jembatan SNI 1725:2016. (Tidak Diterbitkan). Universitas Islam Indonesia.