

TUGAS AKHIR

**PERENCANAAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN
TUKAD YEH UNDA MENGGUNAKAN BETON
PRATEGANG PC BULB TEE GIRDER
(*STRUCTURAL PLANNING OF THE TUKAD YEH
UNDA BRIDGE USING PRESTRESSED CONCRETE PC
BULB TEE GIRDER*)**

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



**Rafly Naufal Hawari
18511266**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
PROGRAM SARJANA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2023**

TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN TUKAD YEH UNDA MENGGUNAKAN BETON PRATEGANG *PC BULB TEE GIRDER* (*STRUCTURAL PLANNING OF THE TUKAD YEH UNDA BRIDGE USING PRESTRESSED CONCRETE PC BULB TEE GIRDER*)

Disusun oleh:

Rafly Naufal Hawari
18511266

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

Diuji pada tanggal 26 Oktober 2023
Oleh Dewan Penguji

Dosen Pembimbing

Ir. Suharyatma, M.T.
NIK: 865110201

Dosen Penguji I

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

Dosen Penguji II

Elvis Saputra, S.T., M.T.
NIK: 205111302



Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

Ir. Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. (Eng.), IPM.

NIK: 095110101

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, 26 Oktober 2023

Yang membuat pernyataan,



Rafly Naufal Hawari

(18511266)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahrobbil'alamin. Puja dan puji Syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala Rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "*Perencanaan Struktur Atas Jembatan Tukad Yeh Unda menggunakan Beton Prategang PC Bulb Tee girder*". Tugas Akhir ini merupakan syarat akademik dalam menyelesaikan Pendidikan Sarjana pada Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan dan kendala yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik serta motivasi dari berbagai pihak, Alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Oleh karena itu izinkanlah penulis mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada pihak-pihak yang telah membimbing dan membantu dalam penyusunan Tugas Akhir ini yaitu kepada:

1. Ibu Ir. Yunalia Muntafi, S. T., M. T., Ph. D. (Eng)., IPM. Selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia
2. Bapak Ir. Suharyatma, M.T selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan banyak masukan serta bimbingan dalam proses mengerjakan Tugas Akhir.
3. Bapak Sarkoni dan Ibu Intan Cahyawati selaku kedua orang tua penulis, yang tiada henti meberikan doa dan dukungan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan pendidikan.
4. Teman-teman JPLL yang selalu memberikan dukungan dan motivasi nya.

Penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan juga pembacanya.

Yogyakarta, 26 Oktober 2023
Penulis,

Rafly Naufal Hawari
18511266

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
ABSTRAK	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
BAB I	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	2
1.5 Batasan Penelitian	2
BAB II	4
2.1 Tinjauan Penelitian Terdahulu	4
2.2 Perbandingan Penelitian	6
BAB III	7
3.1 Tinjauan Umum	7
3.2 Pengertian Jembatan	7
3.3 Material	9
3.4 Prinsip Beton Prategang	9

3.4.1 Sistem Penarikan Baja Prategang	10
3.5 Batasan Tegangan	12
3.6 Pembebanan Jembatan Berdasarkan SNI 1725-2016	15
3.6.1 Beban Permanen	15
3.6.2 Beban Lalu Lintas	16
3.6.3 Aksi Lingkungan	19
3.6.4 Kombinasi Pembebanan	22
3.6.5 Lokasi Pusat Gaya Pretegang	24
3.6.6 Batasan Tegangan Baja Prategang	24
3.6.7 Batas Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang	24
3.6.8 Tegangan Tekan Saat Layan	25
3.6.9 Tegangan Tarik Saat Layan	26
3.7 Kehilangan Prategang	27
3.8 Kapasitas Lentur Penampang	34
3.9 Gaya Geser	36
BAB IV	38
4.1 Tinjauan Umum	38
4.2 Lokasi Penelitian	38
4.3 Data Struktur	39
4.4 Tahapan Perencanaan	42
BAB V	45
5.1 Tinjauan Umum	45
5.2 Perencanaan Gelagar Jembatan	45
5.2.1 Perhitungan Modulus Penampang <i>PC Bul-tee Girder</i> H-220cm	46
5.2.2 Pembebanan Gelagar	52

5.2.3 Kebutuhan Tendon	76
5.2.4 Kehilangan Prategang	93
5.2.5 Pemeriksaan Tegangan	123
5.2.6 Desain Penulangan Nonprategang Gelagar	133
5.2.7 Kapasitas Lentur Penampang	136
5.2.8 Kapasitas Geser Penampang	144
5.2.9 Desain Penulangan pada Kantilever	146
5.3 Pembahasan	154
BAB 6	158
6.1 Kesimpulan	158
6.2 Saran	158
DAFTAR PUSTAKA	159
LAMPIRAN	160

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Antara Penelitian Terdahulu dan Penelitian Yang Akan Dilakukan	6
Tabel 3. 1 Persyaratan Material	9
Tabel 3. 2 Batasan Tegangan Baja Prategang	12
Tabel 3. 3 Batasan Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang	13
Tabel 3. 4 Batas Tegangan Tekan saat Layan	13
Tabel 3. 5 Batasan Tegangan Tarik saat Layan	14
Tabel 3. 6 Berat Isi Beban Mati	15
Tabel 3. 7 Faktor Beban Untuk Berat Sendiri	16
Tabel 3. 8 Faktor Beban Untuk Beban Mati Tambahan	16
Tabel 3. 9 Nilai V_0 dan Z_0 untuk Berbagai Variasi Kondisi Permukaan Hulu	20
Tabel 3. 10 Tekanan Angin Dasar	21
Tabel 3. 11 Tabel Kombinasi Pembebanan	23
Tabel 3. 12 Batasan Tegang Pada Baja Prategang	24
Tabel 3. 13 Batasan Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang	25
Tabel 3. 14 Batas Tegangan Tekan Saat Layan	25
Tabel 3. 15 Batas Tegangan Tarik Saat Layan	26
Tabel 3. 16 Persamaan Menghitung Kehilangan Prategang Akibat Friksi	27
Tabel 4. 1 Data Jembatan	39
Tabel 4. 2 Rencana Pengerjaan Tugas Akhir	44
Tabel 5. 1 Rekapitulasi Perhitungan Statis Momen Penampang Gelagar	48
Tabel 5. 2 Rekapitulasi Perhitungan Inersia Momen	50
Tabel 5. 3 Rekapitulasi Perhitungan Berat Sendiri Gelagar	54
Tabel 5. 4 Perhitungan Beban Mati Tambahan Gelagar	57
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Hasil Pembebanan pada PC Bulb-tee girder	68
Tabel 5. 6 Persamaan Perhitungan Momen dan Gaya Geser pada Jarak Tertentu	69

Tabel 5. 7 Momen pada Gelagar Akibat Beban	70
Tabel 5. 8 Gaya Geser pada Gelagar Akibat Beban	71
Tabel 5. 9 Kombinasi Pembebanan untuk Momen Akibat Beban pada Gelagar	73
Tabel 5. 10 Kombinasi Pembebanan untuk Gaya Geser Akibat Beban pada Gelagar	74
Tabel 5. 11 Data Modulus Penampang <i>PC Bulb-tee Girder</i>	76
Tabel 5. 12 spesifikasi Baja Prategang Berdasarkan VSL	80
Tabel 5. 13 Eksentrisitas masing-masing Tendon	86
Tabel 5. 14 Hasil Perhitungan Lintasan Tendon	88
Tabel 5. 15 Sudut Angkur	89
Tabel 5. 16 Tata Letak Tendon	91
Tabel 5. 17 Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan	95
Tabel 5. 18 Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur	98
Tabel 5. 19 Rekapitulasi Kehilangan Prategang pada Tengah Bentang	120
Tabel 5. 20 Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Transfer	125
Tabel 5. 21 Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Konstruksi	127
Tabel 5. 22 Tegangan Penampang saat Kondisi Layan	129
Tabel 5. 23 Momen yang bekerja pada Sambungan	131
Tabel 5. 24 Gaya Prategang Efektif dan Kehilangan Prategang pada Sambungan	132
Tabel 5. 25 Pemeriksaan Tegangan pada Serat Atas Sambungan Gelagar	132
Tabel 5. 26 Pemeriksaan Tegangan pada Serat Bawah Sambungan Gelagar	133
Tabel 5. 27 Rekapitulasi Penampang Blok Tekan	141
Tabel 5. 28 Rekapitulasi Perhitungan Kapasitas Lentur	144
Tabel 5. 29 Rekapitulasi Perhitungan Kehilangan Prategang	157
Tabel 5. 30 Hasil Perhitungan Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser	157

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Lokasi Jembatan Tukad Yeh Unda Bali	2
Gambar 3. 1 Metode Pratarik	10
Gambar 3. 2 Metode Pascatarik	11
Gambar 3. 3 Beban Lajur “D”	17
Gambar 3. 4 Pembebanan Truk “T” (500kN)	18
Gambar 4. 1 Lokasi Jembatan Tukad Yeh Unda	38
Gambar 4. 2 Gambar Tampak Samping Rencana Jembatan Tukad Yeh Unda Bali	39
Gambar 4. 3 Tampak Depan Penampang Tee Girder Bagian Lapangan dan Tumpuan	40
Gambar 4. 4 Tampak Samping Girder Jembatan Panjang 60 Meter	40
Gambar 4. 5 Potongan A-A Rencana Jembatan Tukad Yeh Unda Bali	41
Gambar 4. 6 Potongan B-B Rencana Jembatan Tukad Yeh Unda Bali	41
Gambar 4. 7 <i>Flow Chart</i> Perencanaan Jembatan Tukad Yeh Unda Bali	43
Gambar 5. 1 Tampak Depan Penampang Gelagar	45
Gambar 5. 2 Tampak Samping Gelagar <i>PC Bulb-tee</i> H-220cm	46
Gambar 5. 3 Pembagian Bagian Penampang Gelagar <i>PC Bulb-tee Girder</i>	46
Gambar 5. 4 ilustrasi letak titik berat gelagar	49
Gambar 5. 5 Detail Dimensi Diafragma	52
Gambar 5. 6 Penampang Gelagar Pada Bagian Tumpuan dan Lapangan	53
Gambar 5. 7 Pembebanan Lajur “D”	57
Gambar 5. 8 Faktor Beban Dinamis untuk Pembebanan Lajur “D”	58
Gambar 5. 9 Pembebanan Akibat Gaya Rem	59
Gambar 5. 10 Pembebanan Angin pada Struktur	63
Gambar 5. 11 Diagram Momen Akibat Beban pada gelagar	75
Gambar 5. 12 Diagram Gaya Geser Akibat Beban pada Gelagar	75

Gambar 5. 13 Lokasi Pusat Prategang dan Eksentrisitas serta Diagram Tegangan pada Tengah Bentang	77
Gambar 5. 14 posisi tendon di tengah bentang	82
Gambar 5. 15 Posisi Tendon di Tumpuan	84
Gambar 5. 16 Lintasan Tendon	87
Gambar 5. 17 Sudut Angkur	89
Gambar 5. 18 Tata Letak Tendon	92
Gambar 5. 19 Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan	95
Gambar 5. 20 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pergeseran Angkur dan Gesekan	96
Gambar 5. 21 Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan dan Pergeseran Angkur	99
Gambar 5. 22 Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Transfer	103
Gambar 5. 23 Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Final	107
Gambar 5. 24 Diagram Tegangan Penampang saat Transfer	125
Gambar 5. 25 Diagram Tegangan Penampang saat Konstruksi	127
Gambar 5. 26 Diagram Tegangan Penampang saat Layan	129
Gambar 5. 27 Letak Sambungan pada Gelagar	130
Gambar 5. 28 Pembagian Bagian Gelagar Nonprategang untuk Perhitungan Penulangan	133
Gambar 5. 29 Diagram Tegangan Gelagar	136
Gambar 5. 30 Potongan Penampang Gelagar	140
Gambar 5. 31 Ilustrasi Struktur Jepit pada Sayap Gelagar	146
Gambar 5. 32 Penampang Kantilever	147
Gambar 5. 33 Denah Daerah Pelat Kantilver yang Ditinjau	149
Gambar 5. 34 Penempatan Beban Roda Truk	149
Gambar 5. 35 Penulangan pada Kantilever	153
Gambar 5. 36 Diagram Momen Yang Terjadi Akibat Beban pada Gelagar	154
Gambar 5. 37 Diagram Gaya Geser Akibat Beban pada Gelagar	155

DAFTAR LAMPIRAN

Gambar L-1. 1 <i>Long Section</i> Jembatan Tukad Yeh Unda	162
Gambar L-1. 2 Potongan A-A Jembatan Tukad Yeh Unda	163
Gambar L-1. 3 Potongan B-B Jembatan Tukad Yeh Unda	163
Gambar L-1. 4 Penampang PC Bulb-Tee girder pada Bagian Tumpuan dan Lapangan	164
Gambar L-1. 5 Letak Tendon pada Penampang di Tumpuan dan Lapangan	164
Gambar L-1. 6 Penulangan Lentur Nonprategang pada Gelagar	165
Gambar L-1. 7 Penulangan Pelat Kantilever pada Gelagar	165

ABSTRAK

Jembatan adalah struktur yang berfungsi untuk menghubungkan dua tempat yang terhalang oleh rintangan. Jembatan Tukad Yeh Unda yang terletak di Kabupaten Klungkung merupakan jembatan yang struktur atasnya di desain menggunakan beton prategang *PC Bulb-tee girder* dengan tinggi 220 cm. Jembatan ini memiliki panjang 180 meter yang terbagi menjadi 3 bentang dengan panjang masing-masing bentang yaitu 60 meter. *PC Bulb-tee girder* yang digunakan pada jembatan ini merupakan produk *precast concrete* milik PT. Wijaya Karya Beton Tbk. Diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat dijadikan referensi untuk mendesain struktur atas jembatan dengan bentang 60 meter yang efektif.

Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan struktur atas jembatan menggunakan beton prategang *PC Bulb-tee girder* sesuai dengan standar pada SNI 1725-2016 , RSNI-T-12-2004, dan AAHSTO LRFD.

Dari hasil perhitungan maka didapatkan bahwa jumlah tendon yang dibutuhkan pada *PC Bulb-tee girder* adalah 5 tendon dengan total 95 *strand* dan Presentase kehilangan prategang yang terjadi pada *PC Bulb-tee girder* yaitu 14,228%.

Kata Kunci: Jembatan, Beton Prategang, *PC Bulb-tee girder*.

ABSTRACT

A bridge is a structure that functions to connect two places that are blocked by obstacles. The Tukad Yeh Unda Bridge, located in Klungkung Regency, is a bridge whose upper structure is designed using PC Bulb-tee girder prestressed concrete with a height of 220 cm. This bridge has a length of 180 meters which is divided into 3 spans with a length of 60 meters each. The PC Bulb-tee girder used on this bridge is a precast concrete product owned by PT. Wijaya Karya Beton Tbk. It is hoped that this research can be used as a reference for designing an effective bridge superstructure with a span of 60 meters.

This research aims to plan the upper structure of a bridge using PC Bulb-tee girder prestressed concrete in accordance with the standards in SNI 1725-2016, RSNI-T-12-2004, and AAHSTO LRFD.

From the calculation results, it was found that the number of tendons needed in the PC Bulb-tee girder is 5 tendons with a total of 95 strands and the percentage of prestress loss that occurs in the PC Bulb-tee girder is 14.228%.

Keyword: *Bridge, Prestress concrete, PC Bulb-tee girder*

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

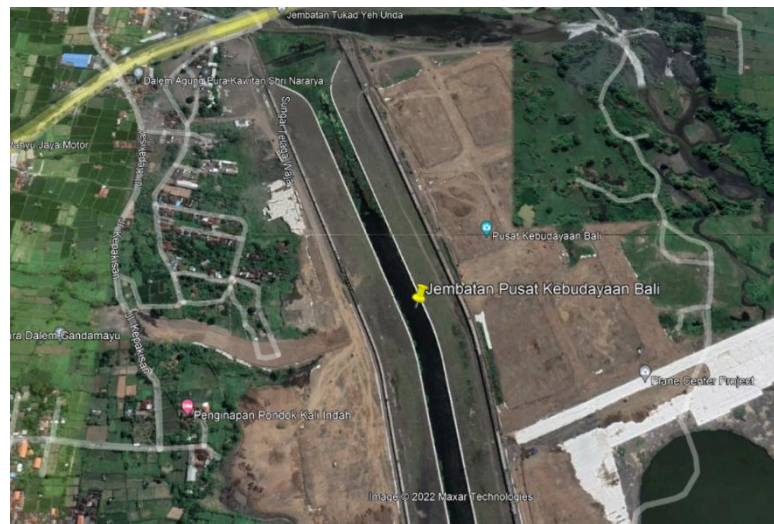
Bali merupakan salah satu provinsi di Indonesia yang menjadi destinasi bagi para wisatawan domestik maupun mancanegara karena keindahan alam dan budayanya. Karena budaya Bali menjadi salah satu daya tarik bagi para wisatawan, maka pada awal tahun 2022 pemerintah Provinsi Bali merencanakan pembangunan pusat kebudayaan Bali yang berada di Kabupaten Klungkung, yang nantinya pusat kebudayaan Bali ini akan dijadikan sebagai destinasi baru untuk memajukan ekonomi di Klungkung dan sekaligus dapat mengenalkan budaya Bali kepada wisatawan domestik dan juga mancanegara.

Oleh karena itu diperlukan infrastruktur penunjang agar destinasi pusat kebudayaan Bali dapat terhubung dengan daerah lain disekitarnya, salah satu infrastruktur penunjang itu adalah jembatan. Menurut Kurniati, Rezki (2019) jembatan diperlukan sebagai sarana transportasi penghubung untuk menunjang perpindahan dan pergerakan manusia, barang maupun jasa di wilayah sekitarnya.

Jembatan ini nantinya akan melintasi sungai Telaga Waja yang akan menghubungkan daerah sisi barat sungai dan Kawasan pusat kebudayaan Bali di Kecamatan Klungkung Kabupaten Klungkung.

Jembatan ini memiliki Panjang 180 m dan terdapat 3 bentang, dengan Panjang masing masing 60 m. Dan lebar 9,6 meter, dengan lebar perkerasan jalan 7 m, trotoar 1 m, dan parapet 0.3 m. Dan oprit menggunakan timbunan tanah, dengan Panjang sisi barat 85 m, dan sisi timur 100 m, dengan bentang jembatan yang cukup panjang yaitu 60 m, maka hanya beberapa tipe struktur jembatan saja yang dapat menahan beban jembatan dengan bentang 60 m yaitu tipe rangka, tipe *cabre stayed*,

dan tipe prategang. Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan jembatan dengan tipe prategang segmental karena dapat dipakai pada jembatan bentang panjang dan metode pelaksanaannya lebih mudah dan efektif. Lokasi jembatan Tukad Yeh Unda dapat dilihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1. 1 Lokasi Jembatan Tukad Yeh Unda Bali

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas pada tugas akhir ini yaitu bagaimana hasil perencanaan struktur atas jembatan Tukad Yeh Unda berdasarkan SNI 1725-2016, RSNI T-12-2004 dan AAHSTO LRFD.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu untuk merencanakan desain struktur atas jembatan Tukad Yeh Unda Bali sesuai dengan SNI 1725-2016, RSNI T-12-2004 dan AAHSTO LRFD.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diambil dari pengerjaan tugas akhir ini yaitu :

1. Sebagai alternatif desain jembatan Tukad Yeh Unda Bali sesuai dengan SNI 1725-2016, RSNI T-12-2004 dan AAHSTO LRFD.
2. Sebagai bahan referensi jika terdapat penelitian selanjutnya.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dari perencanaan jembatan Tukad Yeh Unda Bali adalah sebagai berikut :

1. Jembatan merupakan tipe jembatan kelas A.
2. Jembatan menggunakan beton prategang dengan bentang 60 m.
3. Perencanaan hanya meliputi struktur atas jembatan.
4. Gelagar yang digunakan yaitu *PC bulb tee girder*.
5. Perencanaan tidak meliputi Rencana Anggaran Biaya (RAB).
6. Perencanaan desain jembatan mengacu pada :
 - a. Peraturan Standar Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725-2016
 - b. Perencanaan Jembatan Beton Prategang berdasarkan RSNI T-12-2004 dan AAHSTO LRFD.
 - c. Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan Bina Marga 2021
7. Penggambaran desain jembatan menggunakan *software AutoCAD*.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Penelitian Terdahulu

Sebagai bahan referensi dan juga pertimbangan dalam penelitian ini dicantumkan beberapa hasil penelitian terdahulu sebagai berikut

1. Yail J Kim (2020) melakukan penelitian tentang : *prestressed concrete bulb-tee girders in Colorado*.

Jembatan yang berada di Colorado Amerika Serikat menggunakan struktur atas dengan *bulb-tee girder* dengan panjang bentang 40 m, lebar 9,75 m, dan jarak antar gelagar 1,4 m. Profil girder yang digunakan yaitu jenis *bulb-tee girder* 618 tau BT618 dengan tipe CBT54 (*concrete bulb tee*) dengan tinggi 54 *inch* atau 1,4 m. jembatan ini di desain mengacu pada *AAHSTO LRFD* sebagai dasar dalam analisis pembebanan jembatan. Tujuan dari penelitian ini dilakukan adalah untuk mendesain jembatan dengan *bulb-tee girder* dengan penampang modifikasi dari BT618 dan membandingkan *serviceability* dan *stability* nya. Dan hasil yang didapatkan dari penelitian ini yaitu produk hasil pengembangan atau modifikasi dari penampang *bulb-tee girder* mempunyai *serviceability* dan *stability* yang lebih baik dari penampang *bulb-tee* eksisting yang ada di jembatan Colorado.

2. Edison Leo dan Nur Agung (2017) melakukan penelitian tentang : kajian efisiensi *Bulb-tee shape and half slab girder* dengan *blister* tunggal terhadap *PC-I girder*.

Penelitian ini dilakukan di jembatan yang memiliki panjang bentang 35,6 meter dengan lebar jembatan 9 meter. Menggunakan 4 buah *Bulb-tee girder* dengan tinggi 1,7 meter dengan mutu beton K-500 dengan jarak antar girder 2,2 meter. Jembatan ini di desain mengacu pada peraturan pembebanan RSNI T-02-2005

(pembebanan untuk jembatan) serta analisis perencanaan mengacu pada peraturan BMS-92 (*Bridge Management System*) dan RSNI T-12-2004. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui efisiensi *Bulb-tee girder* terhadap *PC-I girder*. Dan hasil yang didapatkan yaitu penampang *Bulb-tee girder* lebih efisien dari sisi tegangan dan volume strand yang digunakan dibandingkan *PC-I girder*

3. Best dan De Valenc (2007) melakukan penelitian tentang : *Design and Construction Considerations for Continuous Post-Tensioned Bulb-Tee Girder Bridges*.

Penelitian ini dilakukan pada *Wonderwood Bridge* di Florida Amerika Serikat, jembatan ini memiliki bentang 60 meter, dengan lebar 30 meter, menggunakan 8 buah *Bulb-tee girder* dengan tinggi penampang girder 2 meter, dan jarak antar girder 3,5 meter. Jembatan ini di desain jembatan ini di desain mengacu kepada *AAHSTO LRFD* sebagai dasar dalam analisis pembebanan jembatan. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk melakukan pertimbangan desain dan konstruksi dari jembatan dengan penampang *bulb-tee girder*.

2.2 Perbandingan Penelitian

Perbandingan penelitian antara penelitian terdahulu dan penelitian yang akan dilakukan dapat dilihat pada Tabel 2.1 dibawah ini.

Tabel 2. 1 Perbandingan Antara Penelitian Terdahulu dan Penelitian Yang Akan Dilakukan

Penelitian Terdahulu				Penelitian Yang Akan Dilakukan
Peneliti	Yail J Kim	Leo dan Nur Agung	Best dan De Velenc	Rafly Naufal Hawari
Tahun	2020	2017	2007	2022
Jenis Jembatan	Beton Prategang	Beton Prategang	Beton Prategang	Beton Prategang
Desain	Struktur Atas	Struktur Atas	Struktur Atas	Struktur Atas
Profil Gelagar	Bulb-tee Girder	Bulb-tee Girder	Bulb-tee Girder	Bulb-tee Girder
Bentang	40 m	35,6 m	60 m	60 m
Peraturan	<i>AAHSTO LRFD</i>	RSNIT-02-2005 dan RSNIT-12-2004	<i>AAHSTO LRFD</i>	SNI 1725-2016, RSNIT-12-2004 dan <i>AAHSTO LRFD</i> .

BAB 3

LANDASAN TEORI

3.1 Tinjauan Umum

Pada bab ini akan menjelaskan mengenai landasan teori yang akan digunakan untuk perencanaan desain jembatan Tukad Yeh Unda Bali. karena jembatan memiliki fungsi yang penting, maka dalam perencanaannya harus memenuhi standar dan acuan yang ada.

3.2 Pengertian Jembatan

Menurut (Annur & Tarigan, 2013) Jembatan adalah suatu konstruksi yang berfungsi untuk menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan berupa alur sungai, lembah yang dalam, danau, saluran irigasi, rel kereta api jalan raya yang melintang tidak sebidang, dll.

1. Berdasarkan fungsinya jembatan dibagi menjadi :
 - a. Jembatan jalan raya (*highway bridge*)
 - b. Jembatan jalan kereta api (*railway bridge*)
 - c. Jembatan pejalan kaki (*pedestrian bridge*)
2. Berdasarkan strukturnya jembatan dibagi menjadi :
 - a. Jembatan Plat (*slab bridge*)
 - b. Jembatan Plat Berongga (*void slab bridge*)
 - c. Jembatan Rangka
 - d. Jembatan Pelengkung (*arch bridge*)
 - e. Jembatan Gantung (*suspension bridge*)
 - f. Jembatan Kabel (*cable stayed bridge*)
 - g. Jembatan Balok
3. Berdasarkan bahan konstruksinya jembatan dibagi menjadi :

- a. Jembatan kayu (*log bridge*)
- b. Jembatan beton (concrete bridge)
- c. Jembatan beton prategang (*prestressed concrete bridge*)
- d. Jembatan baja (*steel bridge*)
- e. Jembatan komposit (*composite bridge*)

Secara umum jembatan dibagi menjadi dua bagian, yaitu bagian struktur atas jembatan (*upperstructure*) dan bagian struktur bawah jembatan (*substructure*). Sesuai dengan istilahnya bagian struktur atas jembatan berfungsi untuk menopang semua beban yang bekerja meliputi berat sendiri (*self weight*), beban mati (*dead load*), beban mati tambahan (*additional dead load*), beban lalu lintas kendaraan, gaya rem, beban pejalan kaki, dan lain-lain yang kemudian disalurkan ke struktur bagian bawah. Struktur bagian atas jembatan meliputi :

1. *Slab* kendaraan,
2. *Slab* trotoar,
3. *Kerb*,
4. Diafragma,
5. Gelagar (*girder*),
6. *Tiang sandaran*,
7. Pipa drainase.

Sedangkan bagian bawah struktur jembatan berfungsi untuk menerima dan memikul beban yang diberikan bangunan atas dan kemudian disalurkan ke fondasi. Struktur bawah jembatan meliputi :

1. *Abutment*,
2. *Pilar*,
3. *Pondasi*.

3.3 Material

Persyaratan material yang digunakan berdasarkan RSNI T-12-2004 adalah seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 1 Persyaratan Material

Material	Keterangan
Beton	<ul style="list-style-type: none"> - Kuat tekan beton minimal untuk komponen struktural adalah 20 MPa - Kuat tekan beton minimum untuk beton prategang adalah 30 MPa
Baja Tulangan	<ul style="list-style-type: none"> - Baja tulangan yang digunakan tidak boleh lebih dari 550 MPa
Baja Prategang	<ul style="list-style-type: none"> - Tegangan leleh <i>strand</i> adalah $85\% f_{pu}$ - Tegangan leleh untuk low <i>relaxation strand</i> adalah $90\% f_{pu}$

3.4 Prinsip Beton Prategang

Pada perencanaan jembatan Tukad Yeh Unda, struktur utama yang digunakan adalah beton prategang. Menurut (Batubara & Simatupang, 2018) Beton prategang adalah beton bertulang yang diberikan gaya pada arah longitudinal dari elemen strukturalnya, sehingga gaya prategang dapat mencegah terjadinya retak dengan cara mengurangi tegangan Tarik di bagian tumpuan dan daerah kritis pada kondisi beban kerja, sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan torsional penampang tersebut.

Pada desain jembatan Tukad Yeh Unda ini penampang beton prategang yang digunakan yaitu *PC Bulb Tee Girder*, bentuk dari penampang ini yaitu seperti I girder namun memiliki *half slab* pada bagian sayap atas dari *girder*. Menurut (Leo & M.H., 2017) penampang ini merupakan penampang modifikasi dari gelagar I

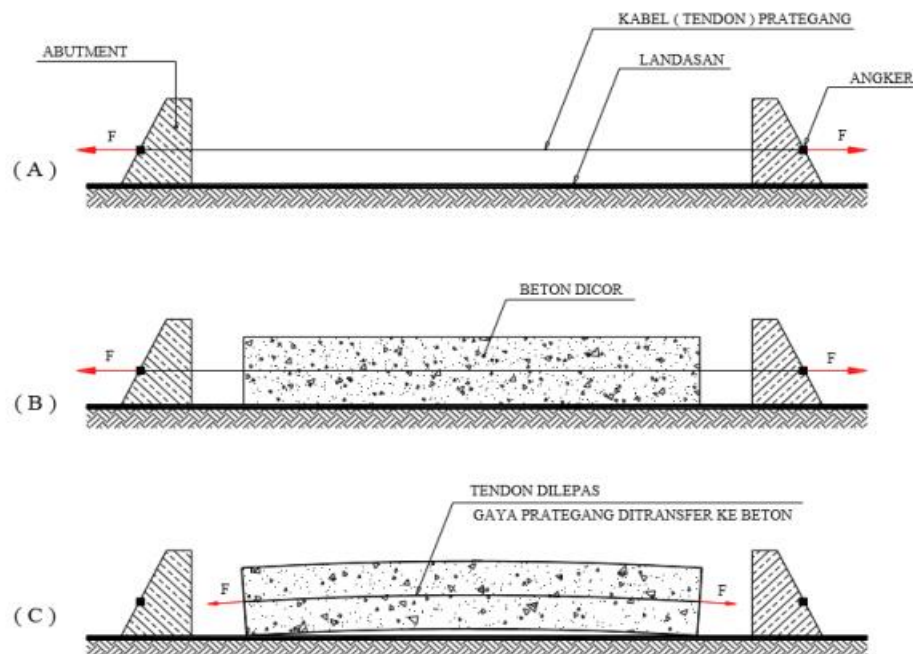
(PC-I *girder*) yang dikembangkan oleh negara Korea, konsep utama dari penampang ini adalah untuk mengurangi jumlah angkur pada ujung balok dan memindahkannya ke *intermediate* (tengah) balok pada posisi *blister*, sehingga dapat mengoptimalkan penggunaan angkur di daerah tumpuan dan efisiensi dalam penggunaan kabel *strand*.

PC Bulb Tee girder yang digunakan dalam perencanaan desain jembatan Tukad Yeh Unda merupakan produk dari Wika Beton, yaitu *PC Bulb Tee girder* dengan tinggi penampang 220 cm, dengan *PC Bulb Tee girder* segmental yang memiliki panjang 60,8 meter dan mempunyai 9 segmen yang memiliki panjang berurutan dari kiri yaitu 5 m, 6 m, 7,4 m, 8 m, 8 m, 8m, 7,4 m, 6 m, dan 5 m.

3.4.1 Sistem Penarikan Baja Prategang

1. Pratarik (*Pretensioning*)

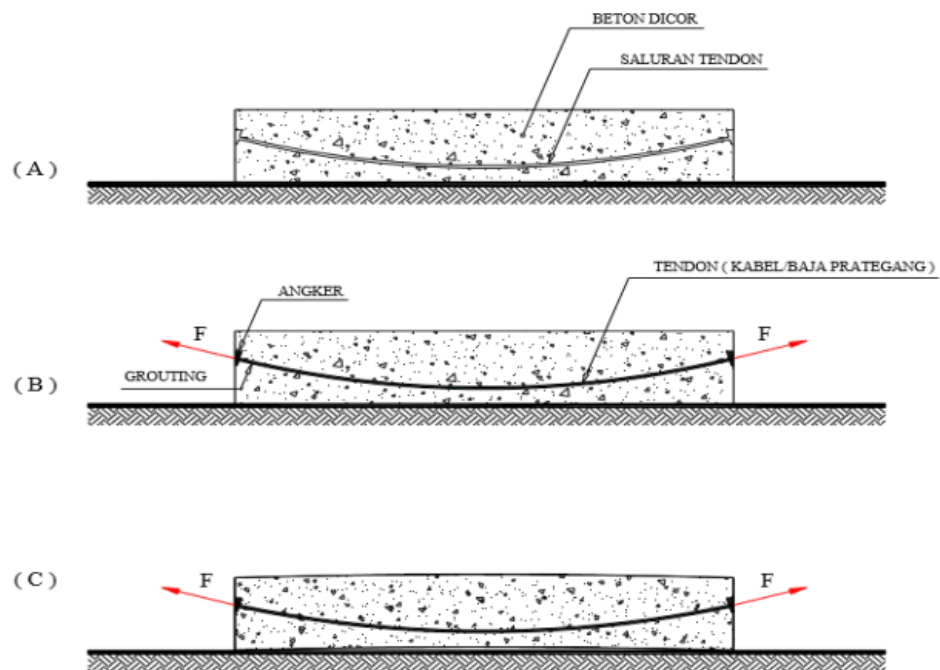
Pada sistem pratarik baja diberikan gaya prategang terlebih dahulu sebelum beton di cor, berikut prinsip dari metode ini dapat dilihat pada gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3. 1 Metode Pratarik

2. Pascatarik (*Postension*)

Pada sistem ini beton dicetak terlebih dahulu dan terlebih dahulu di dalamnya sudah diletakkan saluran untuk kabel baja, saluran ini disebut *duct*. Berikut prinsip dari metode ini dapat dilihat pada gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3. 2 Metode Pascatarik

3.5 Batasan Tegangan

Agar tidak terjadi *overstress*, tegangan yang terjadi pada tendon pada batas layan (*service limit state*), keadaan batas kekuatan (*strength limit state*), dan keadaan batas ekstrem (*extreme event limit state*) harus dibatasi dengan ketentuan Batasan tegangan seperti yang diatur pada AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.2.

1. Batasan tegangan pada baja prategang

Batasan tegangan pada baja prategang diatur seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 2 Batasan Tegangan Baja Prategang

Condition	Tendon type		
	Plain High Strength Bars	Low Relaxation Strand	Deformed High-Strength Bars
<i>Pretensioning</i>			
Immediately prior to transfer (f_{pbt})	$0,70 f_{pu}$	$0,75 f_{pu}$	$0,80 f_{pu}$
At service limit state after all losses (f_{pe})	$0,80 f_{py}$	$0,80 f_{py}$	$0,80 f_{py}$
<i>Post-Tensioning</i>			
Prior to seating-short-term f_{pbt} may be allowed	$0,90 f_{py}$	$0,90 f_{py}$	$0,90$
At anchorages and couplers immediately after anchor set	$0,70 f_{pu}$	$0,70 f_{pu}$	$0,70 f_{pu}$
Elsewhere along length of member away from anchorages and couplers immediately after anchor set	$0,70 f_{pu}$	$0,70 f_{pu}$	$0,70 f_{pu}$
At service limit state after losses (f_{pe})	$0,80 f_{py}$	$0,80 f_{py}$	$0,80 f_{py}$

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

2. Beton sebelum kehilangan prategang

Batasan tegangan tekan sebelum terjadi kehilangan prategang adalah $0,6\sqrt{f'_c}$.

Batasan ini diatur dalam AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.3.1b. seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 3 Batasan Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang

<i>Bridge Type</i>	<i>Location</i>	<i>Stress Limit</i>
<i>Other Than Segmentally Constructed Bridges</i>	<ul style="list-style-type: none"> <i>In precompressed tensile zone without bonded reinforcement</i> <i>In areas other than the precompressed tensile zone and without bonded reinforcement</i> <i>In areas with bonded reinforcement (reinforcing bars or prestressing steel) sufficient to resist the tensile force in the concrete computed assuming an uncracked section, where reinforcement is proportioned using a stress of 0.5f_y, not to exceed 30.0 ksi.</i> <i>For handling stresses in prestressed piles</i> 	N/A $0,0948\lambda\sqrt{f'_{ci}} \leq 0,2(ksi)$ $0,24\lambda\sqrt{f'_{ci}}$ $0,158\lambda\sqrt{f'_{ci}}(ksi)$
		<i>Longitudinal Stresses through Joints in the Precompressed Tensile Zone</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>Joints with minimum bonded auxiliary reinforcement through the joints, which is sufficient to carry the calculated tensile force at a stress of 0.5f_y; with internal tendons or external tendons</i> <i>Joints without the minimum bonded auxiliary reinforcement through the joints</i>
<i>Segmentally Constructed Bridges</i>	<i>Transverse Stresses</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>For any type of joint</i> 	$0,0948\lambda\sqrt{f'_{ci}}(ksi)$
	<i>Stresses in Other Areas</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>For areas without bonded nonprestressed reinforcement</i> <i>In areas with bonded reinforcement (reinforcing bars or prestressing steel) sufficient to resist the tensile force in the concrete computed assuming an uncracked section, where reinforcement is proportioned using a stress of 0.5 for not to exceed 30.0 ksi.</i> 	No tension $0,19\lambda\sqrt{f'_{ci}}(ksi)$

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

3. Tegangan tekan saat layan

Tegangan tekan pada gelagar diperiksa pada kombinasi beban keadaan batas layan I. batas tegangan ini digunakan pada gelagar dengan mutu beto hingga 103 MPa. Batasan tegangan ini diatur dalam AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.3.2a. seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 4 Batas Tegangan Tekan saat Layan

<i>Location</i>	<i>Stress Limit</i>
<ul style="list-style-type: none"> <i>Due to the sum of effective prestress and permanent loads</i> 	$0,45f'_c(ksi)$
<ul style="list-style-type: none"> <i>Due to the sum of effective prestress, permanent loads, and transient loads as well as during shipping and handling</i> 	$0,60\Phi_w f'_c(ksi)$

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

4. Tegangan Tarik saat layan

Kombinasi beban layan meliputi beban lalu lintas, tegangan Tarik komponen prategang diperiksa dengan kombinasi layan III. Batasan tegangan ini diatur dalam AAHSTO LRFD seperti pada pasal 5.9.2.3.2b seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 3. 5 Batasan Tegangan Tarik saat Layan

<i>Bridge Type</i>	<i>Location</i>	<i>Stress Limit</i>
<i>Other Than Segmentally Constructed Bridges</i> <i>These limits may be used for normal weight concrete with compressive strengths for use in design up to 15.0 ksi and lightweight concrete up to 10.0 ksi.</i>	<i>Tension in the Precompressed Tensile Zone, Assuming Uncracked Sections</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>For components with bonded prestressing tendons or reinforcement that are subjected to not worse than moderate corrosion conditions</i> <i>For components with bonded prestressing tendons or reinforcement that are subjected to severe corrosive conditions</i> 	$0,19\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0,6(\text{ksi})$ $0,0948\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0,3(\text{ksi})$
	<i>For components with unbonded prestressing tendons</i>	<i>No tension</i>
<i>Segmentally Constructed Bridges</i> <i>These limits may be used for normal weight concrete with compressive strengths for use in design up to 15.0 ksi and lightweight concrete up to 10.0 ksi.</i>	<i>Longitudinal Stresses through Joints in the Precompressed Tensile Zone</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>Joints with minimum bonded auxiliary reinforcement through the joints sufficient to carry the calculated longitudinal tensile force at a stress of 0.5 fy; internal tendons or external tendons</i> <i>Joints without the minimum bonded auxiliary reinforcement through joints</i> 	$0,0948\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0,3(\text{ksi})$ <i>No tension</i>
	<i>Transverse Stresses</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>Tension in the transverse direction in precompressed tensile zone</i> 	$0,0948\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0,3(\text{ksi})$
	<i>Stresses in Other Areas</i> <ul style="list-style-type: none"> <i>For areas without bonded reinforcement</i> <i>In areas with bonded reinforcement sufficient to resist the tensile force in the concrete computed assuming an uncracked section, where reinforcement is proportioned using a stress of 0.5 fy, not to exceed 30.0 ksi</i> 	<i>No tension</i> $0,19\lambda\sqrt{f'_c} (\text{ksi})$

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

3.6 Pembebanan Jembatan Berdasarkan SNI 1725-2016

Pembebanan merupakan unsur yang sangat penting dalam mendesain jembatan, karena untuk melakukan desain dan perencanaan pada jembatan maka perlu mengetahui beban-beban yang terdapat pada jembatan. Pada SNI 1725-2016 terdapat standar-standar pembebanan yang sudah dibuat oleh pemerintah Indonesia untuk dijadikan sebagai panduan dan juga petunjuk dalam perencanaan jembatan.

3.6.1 Beban Permanen

Beban permanen adalah beban yang terjadi dan bekerja pada struktur jembatan yang selesai dibangun. Yang menurut SNI 1725-2016 yaitu massa dikalikan dengan percepatan gravitasi bumi (g), standar percepatan gravitasi ini adalah $9,81 \text{ m/detik}^2$. Berat isi untuk beban mati berdasarkan SNI 1725-2016 dapat dilihat pada tabel 3.6 dibawah ini.

Tabel 3. 6 Berat Isi Beban Mati

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m ³)	Kerapatan Massa (Kg/m ³)
1	Lapisan permukaan beraspal (bituminous wearing surfaces)	22,0	2245
2	Besi tuang (cast iron)	71,0	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan	17,2	1755
4	Kerikil dipadatkan (rolled gravel, macadam or ballast)	18,8-22,7	1920-2315
5	Beton aspal (asphalt concrete)	22,0	2245
6	Beton ringan (low density)	12,25-19,6	1250-2000
7	Beton $f'_c < 35 \text{ MPa}$	22,0-25,0	2320
	$35 < f'_c < 105 \text{ MPa}$	$22 + 0,022 f'_c$	$2240 + 2,29 f'_c$
8	Baja (steel)	78,5	7850
9	Kayu (ringan)	7,8	800
10	Kayu keras (hard wood)	11,0	1125

Sumber : SNI 1725-2016

1. Berat Sendiri (MS)

Menurut SNI berat sendiri adalah berat bagian tersebut dan elemen struktural lainnya yang dipikul, termasuk berat bahan dan bagan jembatan yang meruoakan elemen structural dan nonstruktural yang dianggap tetap. Adapun factor beban yang digunakan untuk berat sendiri dapat dilihat pada tabel 3.7 dibawah ini.

Tabel 3. 7 Faktor Beban Untuk Berat Sendiri

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MS}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MS}^U)	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Aluminium	1,00	1,10	0,90
	Beton pracetak	1,00	1,20	0,85
	Beton dicor ditempat	1,00	1,30	0,75
	Kayu	1,00	1,40	0,70

Sumber : SNI 1725-2016

2. Beban Mati Tambahan/Utilitas (MA)

Beban mati tambahan adalah seluruh beban elemen-elemen nonstruktural pada jembatan dan besarnya dapat berubah-ubah selama umur jembatan. Faktor beban untuk beban mati tambahan dapat dilihat paada tabel 3.8 dibawah ini.

Tabel 3. 8 Faktor Beban Untuk Beban Mati Tambahan

Tipe Beban	Faktor Beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MA}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MA}^U)	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00 ⁽¹⁾	1,10	0,90
	Aluminium	1,00	1,10	0,90

Catatan⁽¹⁾ : Faktor beban layan sebesar 1,3 digunakan untuk berat utilitas

Sumber : SNI 1725-2016

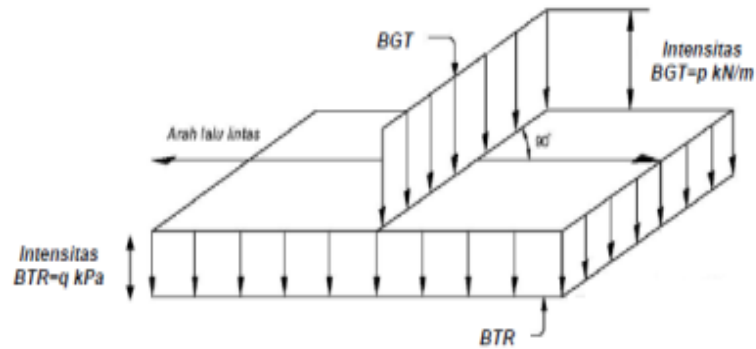
3.6.2 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas yang digunakan untuk perencanaan jembatan terdiri dari beban lajur “D” dan beban truk “T”, yang mana hal ini berdasarkan SNI 1725-2016 tentang beban lalu lintas. Beban lajur “D” bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan satu 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, tiap gandar tersebut ditempatkan pada beberapa posisi yang berbeda dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap gandar terdiri dari dua bidang kontak pembebanan, yang disebut juga sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Setiap lajur lalu lintas rencana hanya perlu diterapkan satu truk “T”. Berikut detail beban pada lalu lintas :

1. Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” terdiri dari beban terbagi rata (BTR) dan beban garis (BGT) seperti pada gambar 3.3 berikut.



Gambar 3. 3 Beban Lajur “D”

(Sumber: SNI 1725-2016)

a. Beban Terbagi Merata (BTR)

Beban terbagi merata (BTR) memiliki intensitas q kPa dengan besaran intensitas beban terbagi merata (q) tergantung pada panjang total yang dibebani (L) yaitu sebagai berikut :

$$\text{Jika } L \leq 30\text{m} : q = 9,0 \text{ kPa} \quad (3.1)$$

$$\text{Jika } L \geq 30\text{m} : q = 9,0 \text{ kPa} \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kPa} \quad (3.2)$$

Keterangan :

q : intensitas beban terbagi merata (BTR) arah memanjang jembatan

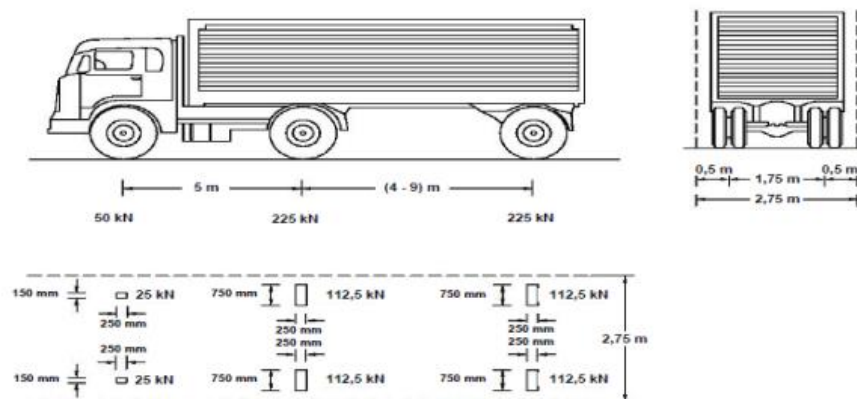
L : panjang total jembatan yang dibebani (m)

b. Beban garis terpusat (BGT)

Beban garis terpusat (BGT) dengan intensitas p kN/m ditempatkan pada posisi tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besar intensitas p yaitu 49,0 kN/m. BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi dalam arah melintang jembatan pada bentang lainnya yang ditujukan untuk mendapatkan momen lentur negative maksimum pada jembatan menerus.

2. Beban Truk “T” (TT)

Beban truk “T” tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban “D”. beban truk bisa digunakan untuk perhitungan lantai. Berikut gambar pembebanan “T” dapat dilihat pada gambar 3.4 berikut.



Gambar 3. 4 Pembebanan Truk “T” (500kN)

(Sumber : SNI 1725-2016)

Pembebanan truk “T” terdiri atas truk *semi-trailer* yang mempunyai susunan gandar seperti gambar 3.4. Berat pada setiap gandar disebarkan menjadi 2 beban merata sama besar. Jarak antara 2 gandar tersebut bisa diubah-ubah dari bentang 4 m sampai dengan bentang 9 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jalan.

3. Gaya Rem (*TB*)

Menurut SNI 1725-2016 Standar Pembebanan Jembatan, gaya rem yang dipakai adalah nilai yang terbesar dari :

- 25% dari berat gandar truk desain atau,
- 5 % dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi merata BTR

Gaya rem diatas harus ditempatkan pada semua jalur rencana yang dimuati dan yang berisi lalu lintas dengan arah yang sama. Gaya ini diasumsikan bekerja secara horizontal pada jarak 1800 mm diatas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal, dan dipilih yang menentukan.

4. Pembebanan pejalan kaki (*TP*)

Menurut SNI 1725-2016 Pembebanan pejalan kaki dengan trotoar yang memiliki lebar lebih dari 600 mm maka harus direncanakan untuk memikul beban pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa dan diasumsikan bekerja bersamaan dengan beban kendaraan pada setiap lajur.

3.6.3 Aksi Lingkungan

Aksi lingkungan adalah pembebanan yang berasal dari pengaruh alamiah lingkungan seperti angin, gempa, temperature dan pengaruh alamiah lainnya.

1. Beban Angin (*EW*)

a. Tekanan angin horizontal

Berdasarkan SNI 1725-2016 pasal 9.6.1 tekanan angin yang ditentukan pada pasal ini diasumsikan disebabkan oleh angin rencana dengan kecepatan dasar (V_B) sebesar 90 hingga 126 km/jam

Beban angin harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada permukaan yang terekspos oleh angin. Untuk jembatan atau bagian jembatan dengan elevasi lebih tinggi dari 10000 m diatas permukaan tanah atau permukaan air, kecepatan angin rencana, V_{DZ} , harus dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_{DZ} = 2,5V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) In \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (3.3)$$

Keterangan :

V_{DZ} = kecepatan angin rencana pada elevasi rencana, Z (km/jam)

V_{10} = kecepatan angin pada elevasi 10000 mm di atas permukaan tanah atau di atas permukaan air rencana

V_B = kecepatan angin rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm

- Z = elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau dari permukaan air dimana beban angin dihitung ($Z > 10000$ mm)
- V_0 = kecepatan gesekan angin (km/jam)
- Z_0 = panjang gesekan di hulu jembatan (m)

V_{10} dapat diperoleh dari :

- Grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang
- Survey angin pada lokasi jembatan
- Jika tidak ada data yang lebih baik, perencana dapat mengasumsikan bahwa $V_{10} = V_B = 90$ sampai 126 km/jam

Nilai V_0 dan Z_0 untuk berbagai variasi kondisi permukaan hulu dapat dilihat pada tabel 3.9 dibawah ini.

Tabel 3. 9 Nilai V_0 dan Z_0 untuk Berbagai Variasi Kondisi Permukaan Hulu

Kondisi	Lahan Terbuka	Sub Urban	Kota
V_0 (km/jam)	13,2	17,6	19,3
Z_0 (mm)	70	1000	2500

(Sumber : SNI 1725-2016)

1) Beban angin pada struktur (EW_s)

Beban angin pada struktur dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

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

Keterangan:

P_B adalah tekanan angin dasar seperti ditentukan dalam tabel dibawah ini

Tabel 3. 10 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

Nilai gaya total beban angin tidak boleh kurang dari 4,4 N/mm pada balok atau gelagar

2) Gaya angin pada kendaraan (EW_t)

Jembatan harus direncanakan menahan gaya akibat tekanan angin pada kendaraan yang diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus dan bekerja 1800 mm diatas permukaan jalan.

b. Tekanan angin vertikal

Jembatan harus mampu memikul beban garis memanjang jembatan yang berupa gaya angin vertikal ke atas sebesar $9,6 \cdot 10^{-4}$ MPa dikalikan lebar jembatan, termasuk parapet dan trotoar. Arah angin ini bekerja tegak lurus terhadap sumbu memanjang jembatan. Dan gaya memanjang tersebut mempunyai titik tangkap seperempat dari lebar jembatan dan bekerja secara bersamaan dengan beban angin horizontal.

3.6.4 Kombinasi Pembebanan

Menurut SNI 1725-2016 gaya total terfaktor yang digunakan dalam perencanaan harus dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$Q = \sum \eta_i \cdot \gamma_i \cdot Q_i \quad (3.10)$$

Keterangan :

η_i = faktor pengubah respon

γ_i = faktor beban

Q_i = gaya atau beban yang bekerja pada jembatan

3.6.5 Lokasi Pusat Gaya Pretegang

Lokasi pusat gaya prategang berdasarkan panduan bidang jalan dan jembatan no.02/M/BM/2021 diasumsikan 5-15 persen dari tinggi gelagar yang diukur dari sisi bawah gelagar.

3.6.6 Batasan Tegangan Baja Prategang

Untuk mencegah terjadinya overstress pada baja prategang, tegangan yang terjadi pada tendon harus berada pada batas layan (*service limit state*), keadaan batas kekuatan (*strength limit state*), dan keadaan batas ekstrem (*extreme event limit state*) perlu dibatasi. Batasan tegangan tersebut diatur pada pasal 5.9.2.2 AAHSTO 2017. Tabel Batasan tegangan pada baja prategang dapat dilihat pada tabel 3.12 dibawah ini.

Tabel 3. 12 Batasan Tegang Pada Baja Prategang

Condition	Tendon Type		
	Plain High-Strength Bars	Low Relaxation Strand	Deformed High-Strength Bars
Pretensioning			
Immediately prior to transfer (f_{pbt})	$0.70f_{pu}$	$0.75f_{pu}$	—
At service limit state after all losses (f_{pe})	$0.80f_{py}$	$0.80f_{py}$	$0.80f_{py}$
Post-Tensioning			
Prior to seating—short-term f_{pbt} may be allowed	$0.90f_{py}$	$0.90f_{py}$	$0.90f_{py}$
At anchorages and couplers immediately after anchor set	$0.70f_{pu}$	$0.70f_{pu}$	$0.70f_{pu}$
Elsewhere along length of member away from anchorages and couplers immediately after anchor set	$0.70f_{pu}$	$0.74f_{pu}$	$0.70f_{pu}$
At service limit state after losses (f_{pe})	$0.80f_{py}$	$0.80f_{py}$	$0.80f_{py}$

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

3.6.7 Batas Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang

Batas tegangan tekan untuk sistem pratarik dan pascatarik sebelum terjadi kehilangan prategang adalah $0.6\sqrt{f'_c}$. Sedangkan batas tegangan tarik pada beton pratekan sebelum terjadi kehilangan prategang diatur dalam AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.3.1b. tabel batasan tegangan beton sebelum kehilangan prategang dapat dilihat pada tabel 3.13 dibawah ini.

Tabel 3. 13 Batasan Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang

Bridge Type	Location	Stress Limit
Other Than Segmentally Constructed Bridges	<ul style="list-style-type: none"> In precompressed tensile zone without bonded reinforcement 	N/A
	<ul style="list-style-type: none"> In areas other than the precompressed tensile zone and without bonded reinforcement 	$0.0948\lambda\sqrt{f'_{ci}} \leq 0.2$ (ksi)
	<ul style="list-style-type: none"> In areas with bonded reinforcement (reinforcing bars or prestressing steel) sufficient to resist the tensile force in the concrete computed assuming an uncracked section, where reinforcement is proportioned using a stress of $0.5f_y$, not to exceed 30.0 ksi. 	$0.24\lambda\sqrt{f'_{ci}}$ (ksi)
	<ul style="list-style-type: none"> For handling stresses in prestressed piles 	$0.158\lambda\sqrt{f'_{ci}}$ (ksi)
Segmentally Constructed Bridges	Longitudinal Stresses through Joints in the Precompressed Tensile Zone	
	<ul style="list-style-type: none"> Joints with minimum bonded auxiliary reinforcement through the joints, which is sufficient to carry the calculated tensile force at a stress of $0.5f_y$; with internal tendons or external tendons 	$0.0948\lambda\sqrt{f'_{ci}}$ (ksi)
	<ul style="list-style-type: none"> Joints without the minimum bonded auxiliary reinforcement through the joints 	No tension
	Transverse Stresses	
	<ul style="list-style-type: none"> For any type of joint 	$0.0948\lambda\sqrt{f'_{ci}}$ (ksi)
	Stresses in Other Areas	
	<ul style="list-style-type: none"> For areas without bonded nonprestressed reinforcement 	No tension
	<ul style="list-style-type: none"> In areas with bonded reinforcement (reinforcing bars or prestressing steel) sufficient to resist the tensile force in the concrete computed assuming an uncracked section, where reinforcement is proportioned using a stress of $0.5f_y$, not to exceed 30.0 ksi. 	$0.19\lambda\sqrt{f'_{ci}}$ (ksi)

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

3.6.8 Tegangan Tekan Saat Layan

Batas tegangan tekan pada saat layan diatur dalam dalam AAHSTO 2017 pasal 5.9.2.3.2a, yang menyatakan bahwa tegangan tekan pada gelagar diperiksa pada kombinasi beban dengan keadaan batas layan I. Batas tegangan ini digunakan pada gelagar dengan mutu beton hingga 103 mPa. Pada tabel 3.14 berikut dapat dilihat batasan tegangan tekan saat layan.

Tabel 3. 14 Batas Tegangan Tekan Saat Layan

Location	Stress Limit
<ul style="list-style-type: none"> Due to the sum of effective prestress and permanent loads 	$0.45f'_c$ (ksi)
<ul style="list-style-type: none"> Due to the sum of effective prestress, permanent loads, and transient loads as well as during shipping and handling 	$0.60\phi_w f'_c$ (ksi)

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

3.6.9 Tegangan Tarik Saat Layan

Batasan tegangan Tarik pada gelagar saat layan ditentukan berdasarkan pasal 5.9.2.3.2b AAHSTO LRFD 2017, yang menyatakan bahwa kombinasi beban layan yang meliputi beban lalu lintas dapat diperiksa dengan menggunakan kombinasi beban layan III. Pada tabel 3.15 dapat dilihat batasan tegangan tarik saat layan, sebagai berikut:

Tabel 3. 15 Batas Tegangan Tarik Saat Layan

Bridge Type	Location	Stress Limit
Other Than Segmentally Constructed Bridges These limits may be used for normal weight concrete with concrete compressive strengths for use in design up to 15.0 ksi and lightweight concrete up to 10.0 ksi.	Tension in the Precompressed Tensile Zone, Assuming Uncracked Sections	
	<ul style="list-style-type: none"> For components with bonded prestressing tendons or reinforcement that are subjected to not worse than moderate corrosion conditions 	$0.19\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0.6$ (ksi)
	<ul style="list-style-type: none"> For components with bonded prestressing tendons or reinforcement that are subjected to severe corrosive conditions For components with unbonded prestressing tendons 	$0.0948\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0.3$ (ksi) No tension
Segmentally Constructed Bridges These limits may be used for normal weight concrete with concrete compressive strengths for use in design up to 15.0 ksi and lightweight concrete up to 10.0 ksi.	Longitudinal Stresses through Joints in the Precompressed Tensile Zone	
	<ul style="list-style-type: none"> Joints with minimum bonded auxiliary reinforcement through the joints sufficient to carry the calculated longitudinal tensile force at a stress of $0.5 f_y$; internal tendons or external tendons Joints without the minimum bonded auxiliary reinforcement through joints 	$0.0948\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0.3$ (ksi) No tension
	Transverse Stresses	
	<ul style="list-style-type: none"> Tension in the transverse direction in precompressed tensile zone 	$0.0948\lambda\sqrt{f'_c} \leq 0.3$ (ksi)
	Stresses in Other Areas	
	<ul style="list-style-type: none"> For areas without bonded reinforcement In areas with bonded reinforcement sufficient to resist the tensile force in the concrete computed assuming an uncracked section, where reinforcement is proportioned using a stress of $0.5 f_y$, not to exceed 30.0 ksi 	No tension $0.19\lambda\sqrt{f'_c}$ (ksi)

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

3.7 Kehilangan Prategang

Kehilangan prategang pada gelagar beton prategang terdiri dari kehilangan seketika dan kehilangan jangka panjang yang dihitung berdasarkan AAHSTO 2017 pasal 5.9.3.1.

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT} \quad (3.11)$$

Keterangan :

Δf_{pT} = total kehilangan prategang

Δf_{pF} = kehilangan prategang akibat friksi

Δf_{pA} = kehilangan prategang akibat slip pada tendon

Δf_{pES} = kehilangan prategang akibat perpendekan elastis

Δf_{pLT} = kehilangan prategang jangka panjang

1. Menentukan Kehilangan Prategang yang Terjadi pada Glagar

Kehilangan prategang yang terjadi terdiri dari 2 fase yaitu:

a. Kehilangan Prategang saat Transfer

1) Kehilangan Prategang Akibat Friksi (Δ_{fpF})

Friksi Wobble dan pengaruh kelengkungan harus diperhitungkan dalam menentukan besar kehilangan prategang pada gelagar akibat friksi. Persamaan untuk menghitung kehilangan prategang akibat friksi terdapat pada AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.2.2.b. table persamaannya dapat dilihat pada tabel 3.16 dibawah ini.

Tabel 3. 16 Persamaan Menghitung Kehilangan Prategang Akibat Friksi

Type of Steel	Type of Duct	K	μ
Wire or strand	Rigid and semirigid galvanized metal sheathing	0.0002	0.15–0.25
	Polyethylene	0.0002	0.23
	Rigid steel pipe deviators for external tendons	0.0002	0.25
High-strength bars	Galvanized metal sheathing	0.0002	0.30

(Sumber : AAHSTO LRFD 2017)

Kehilangan prategang akibat friksi :

$$\Delta f_{pF} = f_{pj} (1 - e^{-(Kx + \mu\alpha)}) \quad (3.12)$$

Keterangan :

Δf_{pF} = tegangan pada baja prategang saat penarikan (*jacking*)

x = panjang tendon prategang dari ujung *jacking* ke titik yang ditinjau (mm)

K = koefisien friksi *wobble* (per mm tendon)

μ = faktor friksi

α = penjumlahan nilai mutlak perubahan angular jalur baja prategang dari ujung *jacking* (arad.)

e = logaritma natural dasar

2) Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur (Δf_{pA})

Kehilangan prategang akibat slip pada tendon (*anchorage set losses*) atau disebut juga dengan kehilangan prategang akibat pergeseran wedge merupakan jenis kehilangan prategang seketika yang terjadi pada gelagar pascatarik. Kehilangan prategang ini terjadi setelah penarikan dilepas dan saat gaya prategang di transfer ke angkur. Kehilangan prategang ini disebabkan oleh slip pada tendon saat dilepas hingga sampai wedge menengkram dan menahan pergerakan tendon dengan kuat.

$$\Delta f_{pA} = \Delta f \left(1 - \frac{x}{L_{pA}}\right) \quad (3.13)$$

$$L_{pA} = \sqrt{\frac{E(\Delta L)L_{pF}}{\Delta f_{pF}}} \quad (3.14)$$

$$\Delta f = \frac{2\Delta f_{pF}L_{pA}}{L_{pF}} \quad (3.15)$$

Keterangan :

- L_{pA} = panjang proyeksi horizontal tendon yang dipengaruhi oleh kehilangan prategang akibat pergeseran angkur (mm)
 x = jarak horizontal dari ujung *jacking* ke titik yang ditinjau (mm)
 Δf = perubahan tegangan karena pergeseran angkur (mPa)
 L_{pF} = jarak terhadap titik yang mengalami kehilangan prategang akibat friksi Δf_{pF} diketahui
 ΔL = panjang pergeseran angkur berkisar antara 0.125 in(3.175 mm) hingga 0.375 in(9.525 mm)
 E = modulus elastisitas angkur (mPa)
 Δf_{pF} = kehilangan prategang akibat friksi

3) Kehilangan Prategang Akibat Perpendekan Elastis

Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis pada gelagar pratekan pascatarik dihitung berdasarkan AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.2.3b.

$$\Delta f_{pES} = \frac{N-1}{2N} \frac{E_p}{E_{ci}} f_{cgp} \quad (3.16)$$

Keterangan :

- N = jumlah tendon
 f_{cgp} = jumlah tegangan pada beton pada titik berat tendon karena gaya prategang setelah penarikan dan berat sendiri gelagar pada daerah momen maksimum (mPa)
 E_p = modulus elastisitas baja prategang (mPa)
 E_{ci} = modulus elastisitas gelagar saat transfer atau saat dibebani (mPa)

b. Kehilangan Prategang saat Transfer hingga Final

1) Kehilangan Prategang Akibat Susut pada Gelagar (Δ_{fpSR})

Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar dapat dihitung sesuai pada AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.2a.

$$\Delta_{fpSR} = \varepsilon_{bid} \cdot E_{ps} \cdot k_{id} \quad (3.17)$$

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot \frac{A_{ps}}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{A_g \cdot e_{mid}^2}{I_g}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{tffi})} \quad (3.18)$$

$$\varepsilon_{bid} = k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{tdi} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \quad (3.19)$$

$$k_f = \frac{35}{7 + f'_{cig}} \quad (3.20)$$

$$k_{hs} = 2 - 0,014 \cdot H_r \quad (3.21)$$

$$k_s = 1,45 - 0,0051 \cdot r_{VS} \quad (3.22)$$

$$k_{tdi} = \frac{t_{di}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{fi}} \quad (3.23)$$

Keterangan :

ε_{bid} = regangan susut gelagar

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

E_{cig} = modulus elastisitas gelaagar saat transfer (MPa)

k_{id} = koefisien penampang tranformasi

ψ_{tffi} = koefisien rangkai gelagar saat final karena pembebanan saat transfer

k_s = faktor pengaruh rasio volume terhadap lus permukaan

k_{hs} = faktor kelembaban untuk susut

k_f = faktor pengaruh kuat tekan beton

k_{tdi} = faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer

r_{VS} = rasio volume terhadap luas permukaan

H_r = kelembaban relatif

f'_{cig} = kuat tekan beton saat transfer (MPa)

t_{di} = perpanjangan waktu antara transfer dan pengecoran pelat (hari)

2) Kehilangan Prategang Akibat Relaksasi Tendon (Δ_{fpR1})

Kehilangan prategang akibat relaksasi tendon rentang waktu transfer hingga pengecoran pelat (Δ_{fpR1}) berdasarkan sub bab 3.7 diasumsikan sebesar 1,2 ksi atau 8 MPa untuk *low relaxation strand*.

3) Kehilangan Prategang Akibat Rangkak pada Gelagar (Δ_{fpCR})

Kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar dihitung sesuai AAHSTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.2b.

$$\Delta_{fpCR} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgpi} \cdot \psi_{idti} \cdot k_{id} \quad (3.24)$$

$$\psi_{idti} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{iddi} \cdot t_i^{-0,118} \quad (3.25)$$

$$f_{cgpi} = \left| \frac{-P_i}{A_{gti}} - \frac{P_i \cdot e_{ti}}{I_{ti}} + \frac{M_{MS-G} \cdot e_{ti}}{I_{ti}} \right| \quad (3.26)$$

$$f_{pi2} = f_{pbt} - (\Delta_{fpES} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpR1}) \quad (3.27)$$

$$P_i = f_{pi2} \cdot A_{ps} \quad (3.28)$$

Keterangan :

f_{cgpi} = tegangan di tendon setelah transfer (MPa)

ψ_{idti} = koefisien rangkak gelagar saat waktu transfer

k_{id} = koefisien penampang transformasi

k_{hc} = faktor kelembaban untuk rangkak

k_f = faktor pengaruh kuat tekan beton

- k_{tdi} = faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer
 t_i = umur gelagar saat transfer (hari)
 P_i = gaya prategang saat setelah transfer (kN)
 e_{ii} = eksentrisitas tendon pada penampang gelagar transformasi di tengah bentang saat transfer (mm)
 A_{gii} = luas penampang transformasi gelagar saat transfer
 I_{ii} = momen inersia penampang gelagar transformasi saat transfer
 f_{pi2} = tegangan saat setelah transfer pada *strand* (MPa)
 f_{pbt} = tegangan baja prategang sebelum transfer (MPa)

Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menentukan kehilangan prategang yang terjadi.

$$\Delta_{fpi} = \Delta_{fpF} + \Delta_{fpA} + \Delta_{fpES} \quad (3.29)$$

$$\Delta_{fpT} = \Delta_{fpA} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpES} + \Delta_{fpLT} \quad (3.30)$$

Teganga pada kondisi awal dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$f_{pi} = 75\% \cdot f_{pu} - \Delta_{fpi} \quad (3.31)$$

$$P_i = A_{ps} \cdot f_{pi} \quad (3.32)$$

Tegangan pada kondisi akhir dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$f_{pe} = 75\% \cdot f_{pu} - \Delta_{fpT} \quad (3.33)$$

$$P_{ef} = A_{ps} \cdot f_{pe} \quad (3.34)$$

Keterangan :

- Δ_{fpi} = kehilangan prategang saat awal (MPa)
 Δ_{fpLT} = kehilangan prategang jagka panjang akibat susut pada beton (MPa)
 Δ_{fpT} = total kehilangan prategang (MPa)
 Δ_{fpF} = kehilangan prategang akibat friksi (MPa)
 Δ_{fpA} = Kehilangan prategang akibat pergeseran angkur (MPa)

- Δ_{fpES} = kehilangan prategang akibat perpendekan elastis (MPa)
 f_{pi} = tegangan baja prategang pada kondisi awal (MPa)
 f_{pu} = kuat tarik baja prategang (MPa)
 P_i = gaya prategang pada kondisi awal (MPa)
 A_{ps} = luas tendon prategang (mm²)
 P_{ef} = gaya prategang pada kondisi akhir (kN)
 f_{pe} = gaya prategang efektif (MPa)

2. Menentukan Tegangan yang Terjadi pada Penampang

a. Kondisi saat transfer

Tegangan pada serat atas (f_{t_i})

$$f_{t_i} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{MS-G}}{S_t} \quad (3.35)$$

Tegangan pada serat bawah (f_{b_i})

$$f_{b_i} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{-P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_b} + \frac{M_{MS-G}}{S_b} \quad (3.36)$$

b. Kondisi saat masa konstruksi

Tegangan pada serat atas (f_{t_kons})

$$f_{t_kons} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{MS}}{S_t} \quad (3.37)$$

Tegangan pada serat bawah (f_{b_kons})

$$f_{b_kons} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{-P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_b} + \frac{M_{MS}}{S_b} \quad (3.38)$$

c. Kondisi saat Layan

Tegangan pada serat atas (f_{t_layan})

$$f_{t_layan} = \frac{-P_{eff}}{A_g} + \frac{P_{eff} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{MS} - M_{MA} - M_{LL}}{S_t} \quad (3.39)$$

Tegangan pada serat bawah (f_{b_layan})

$$f_{b_layan} = \frac{-P_{eff}}{A_g} + \frac{-P_{eff} \cdot e_{mid}}{S_b} + \frac{M_{MS} + M_{MA} + M_{LL}}{S_b} \quad (3.40)$$

Keterangan :

$P_{transfer}$ = tegangan saat transfer (MPa)

P_{eff} = tegangan saat final (kN)

e_{mid} = eksentrisitas gelagar (mm)

S_t = modulus penampang atas (mm³)

S_b = modulus penampang bawah (mm³)

M_{MS_G} = momen akibat berat sendiri gelagar (kNm)

M_{MS} = momen akibat berat sendiri gelagar, pelat, dan diafragma (kNm)

M_{MA} = momen akibat beban mati tambahan (kNm)

M_{LL} = momen akibat beban hidup (kNm)

3.8 Kapasitas Lentur Penampang

Persamaan yang digunakan dalam menghitung kapasitas lentur penampang berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021.

1. Faktor blok tegangan beton (β_1)

Nilai β_1 ditentukan berdasarkan kuat tekan beton (f'_c) yang digunakan. Dengan ketentuan sebagai berikut:

- $f'_c \leq 30MPa$ maka $\beta_1 = 0,85$
- $f'_c > 30MPa$ maka $\beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f'_c - 30)$

Dengan syarat $\beta_1 \geq 0,65$

2. Tinggi efektif penampang (d_p)

$$d_p = h - e \quad (3.41)$$

3. Koefisien friksi wobble (k)

$$k = 2 \cdot \left(1,04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) \quad (3.42)$$

4. Letak sumbu netral

Pada penampang yang berbentuk segi empat perhitungan letak sumbu netral dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$c = \frac{A_{ps} \cdot f_{pu} + A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f'_{cg} \cdot \beta_1 \cdot b + k \cdot A_{ps} \cdot \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (3.43)$$

Namun, jika dalam perhitungan tidak menggunakan baja tulangan untuk tulangan tarik dan tekan maka persamaan direduksi menjadi:

$$c = \frac{A_{ps} \cdot f_{pu}}{0,85 \cdot f'_{cg} \cdot \beta_1 \cdot b + k \cdot A_{ps} \cdot \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (3.44)$$

5. Tegangan rata-rata tendon prategang

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - k \cdot \frac{c}{d_p} \right) \quad (3.45)$$

6. Tinggi blok tekan ekivalen (a)

$$a = c \cdot \beta_1 \quad (3.46)$$

7. Kapasitas lentur penampang di tengah bentang

Untuk menentukan nilai kapasitas lentur dapat digunakan persamaan sebagai berikut.

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (3.47)$$

Keterangan :

d_p = tinggi efektif penampang (mm)

a = tinggi blok tekan (mm)

A_{ps} = luas tulangan baja prategang (mm²)

f_{ps} = tegangan rata-rata baja prategang (MPa)

k = koefisien friksi wobble

f_{py} = tegangan leleh baja prategang (MPa)

f_{pu} = tegangan putus baja prategang (MPa)

f'_{cg} = kuat tekan beton (MPa)

β_1 = faktor blok tegangan beton

b = lebar sayap tekan (mm)

c = letak sumbu netral (mm)

3.9 Gaya Geser

Persamaan yang digunakan dalam menghitung kapasitas geser penampang berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021.

1. Kontribusi gaya prategang terhadap ketahanan geser (V_p)

$$V_p = P_{ef} \cdot \frac{(y_{end} - y_{mid})}{r_{tendon}} \quad (3.48)$$

2. Regangan longitudinal di baja tulangan

$$\varepsilon_s = \frac{\left(\frac{|M_u|}{d_v} + 0,5 \cdot N_u + |V_u - V_p| - A_{ps} \cdot 0,7 \cdot f_{pu} \right)}{E_{ps} \cdot A_{ps}} \quad (3.49)$$

3. Faktor indikasi kemampuan retak diagonal beton

- a. Penampang dengan tulangan minimum

$$\beta = \frac{4,8}{(1 + 750 \cdot \varepsilon_s)} \quad (3.50)$$

- b. Penampang tanpa tulangan minimum

$$\beta = \frac{4,8}{(1 + 750 \cdot \varepsilon_s)} \cdot \frac{51}{(39 + s_{xe})} \quad (3.51)$$

4. Kuat geser beton

Untuk menghitung gaya geser maksimum yang mampu ditahan beton bisa dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_c = 0,083 \cdot \beta \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_v \cdot d_v \quad (3.52)$$

Keterangan :

V_c = ketahanan geser beton (kN)

β = faktor indikasi kemampuan retak diagonal beton

f'_c = kekuatan tekan beton yang direncanakan (MPa)

b_v = lebar efektif badan gelagar (mm)

d_v = kedalaman geser efektif (mm)

V_p = kontribusi gaya prategang pada ketahanan geser (kN)

P_{ef} = gaya prategang efektif (kN)

y_{end} = jarak pusat penampang ke sisi bawah gelagar di tumpuan (mm)

y_{mid} = jarak pusat penampang ke sisi bawah gelagar di tengah bentang (mm)

r_{tendon} = panjang tendon di setengah bentang (mm)

ε_s = regangan longitudinal di baja tulangan

M_u = momen ultimit di muka geser kritis (kNm)

N_u = gaya aksial (kN)

V_u = gaya geser ultimit di muka geser kritis (kN)

BAB 4

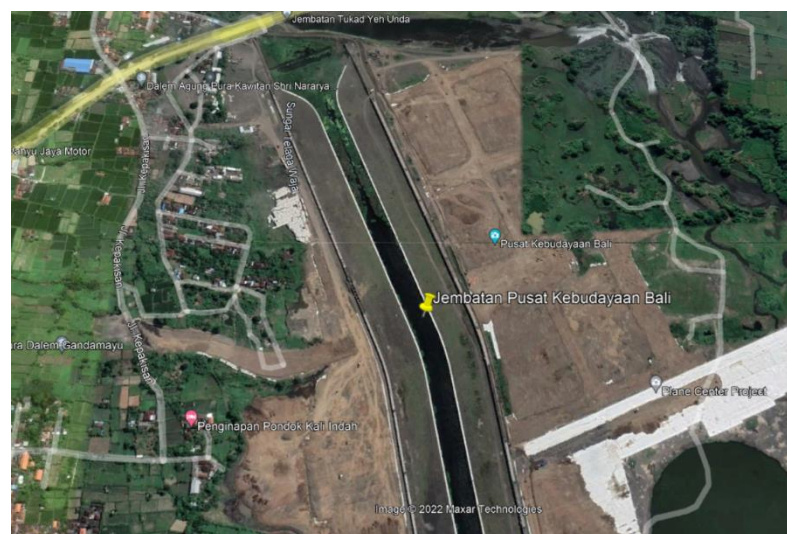
METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian adalah cara atau prosedur untuk melakukan penelitian agar penelitian yang dilakukan dapat mencapai tujuan dan dapat mendapatkan jawaban dari rumusan masalah penelitian. Untuk mencapai tujuan tersebut maka dibutuhkan data-data yang dapat menunjang penelitian. Metode penelitian tidak menyelesaikan permasalahan, tetapi juga dapat mengembangkan ilmu-ilmu dan cara dari penelitian terdahulu yang sejenis. Dengan begitu pengembangan ilmu-ilmu dapat berkembang dan berguna bagi masyarakat luas.

4.2 Lokasi Penelitian

Jembatan Tukad Yeh Unda yang akan direncanakan berada di Kecamatan Klungkung, Kabupaten Klungkung, Provinsi Bali. lokasi jembatan dapat dilihat pada gambar 4.1 dibawah ini.



Gambar 4. 1 Lokasi Jembatan Tukad Yeh Unda

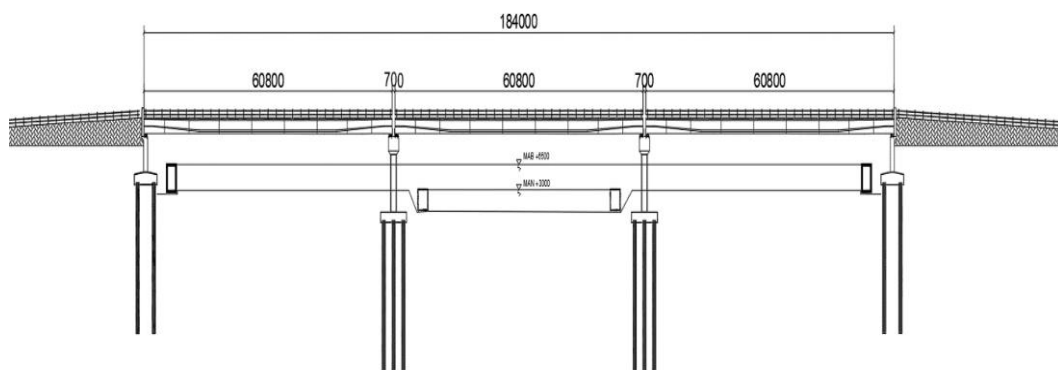
4.3 Data Struktur

Untuk mendesain jembatan Tukad Yeh Unda diperlukan data lapangan. Data lapangan pada jembatana ini dapat dilihat pada tabel 4.1 dibawah ini.

Tabel 4. 1 Data Jembatan

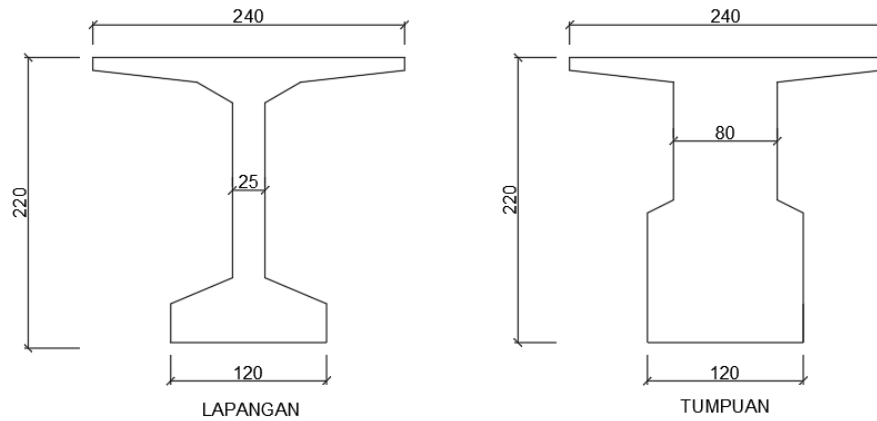
Data Jembatan	Keterangan
Tipe Jembatan	Beton Prategang
Kelas Jembatan	A
Bentang Jembatan	60,8 m
Jumlah Bentang	3
Lebar Bentang	9,6 m
Lebar Perkerasan	7 m
Lebar Trotoar	1 meter
Lebar Barrier	0,3 meter
Jumlah Lajur	2

Adapun girder yang digunakan merupakan produk dari Wika Beton yaitu PC Bulb Tee girder dengan tinggi penampang 220 cm. gambar rencana jembatan dapat dilihat pada gambar 4.2 dibawah ini.



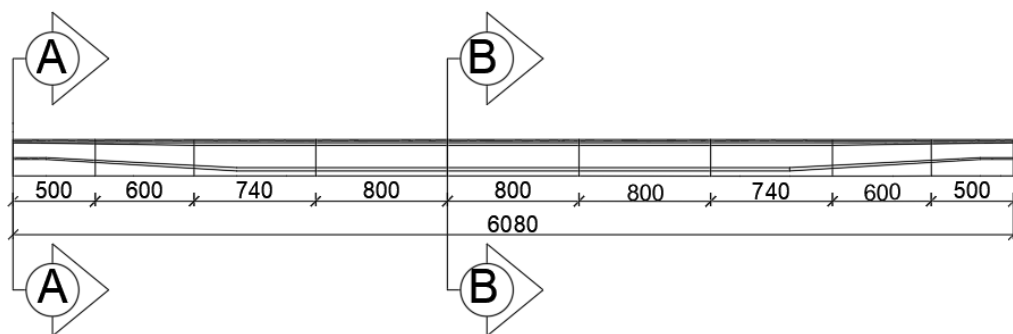
Gambar 4. 2 Gambar Tampak Samping Rencana Jembatan Tukad Yeh Unda Bali

Produk Bulb Tee girder yang di produksi oleh PT. Wika Beton yang dipakai untuk pembangunan jembatan ini dapat dilihat pada gambar 4.3 dibawah ini.



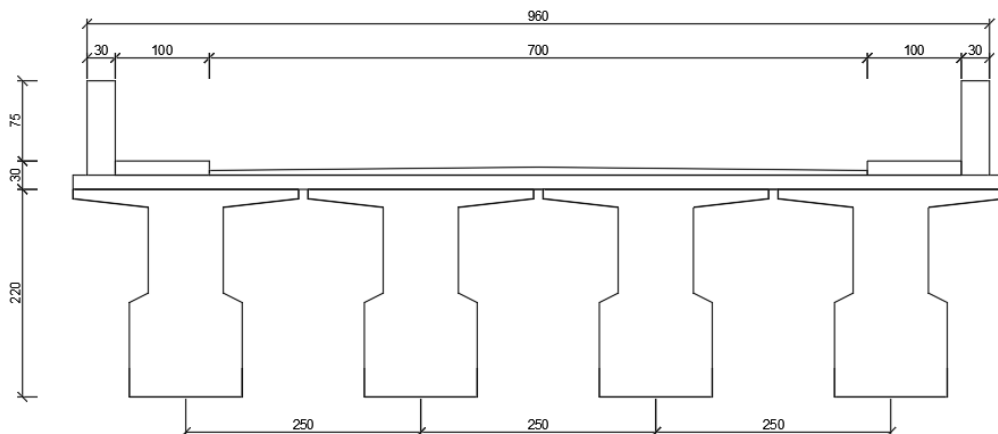
Gambar 4. 3 Tampak Depan Penampang Tee Girder Bagian Lapangan dan Tumpuan

Jembatan Tukad Yeh Unda di desain menggunakan PC Bulb Tee girder segmental dengan tinggi penampang 2,2 m. girder ini memiliki panjang 60,8 meter dan mempunyai 9 segmen yang memiliki panjang berurutan dari kiri yaitu 5 m, 6 m, 7,4 m, 8 m, 8 m, 8m, 7,4 m, 6 m, dan 5 m. gambar tampak samping girder dapat dilihat pada gambar 4.4 dibawah ini.



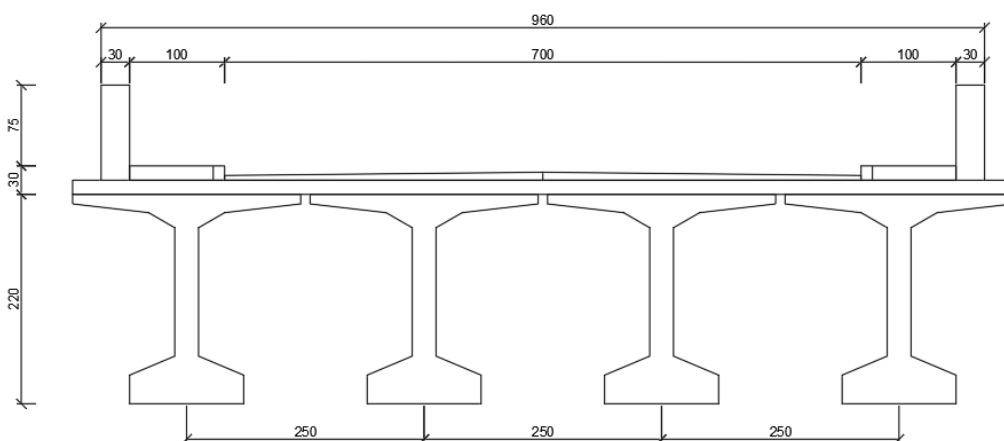
Gambar 4. 4 Tampak Samping Girder Jembatan Panjang 60 Meter

Penampang jembatan ini memiliki lebar 9,6 m dengan menggunakan 4 buah PC Bulb Tee girder dan memiliki lebar jalan perkerasan selebar 7 meter, detail gambar penampang jembatan Tukad Yeh Unda pada bagian tumpuan jembatan dapat dilihat pada gambar 4.5 dibawah ini.



Gambar 4. 5 Potongan A-A Rencana Jembatan Tukad Yeh Unda Bali

Pada bagian lapangan jembatan dimensi penampang girder mengalami perubahan ukuran menjadi lebih ramping, gambar penampang jembatan pada bagian lapangan jembatan dapat dilihat pada gambar 4.6 dibawah ini.



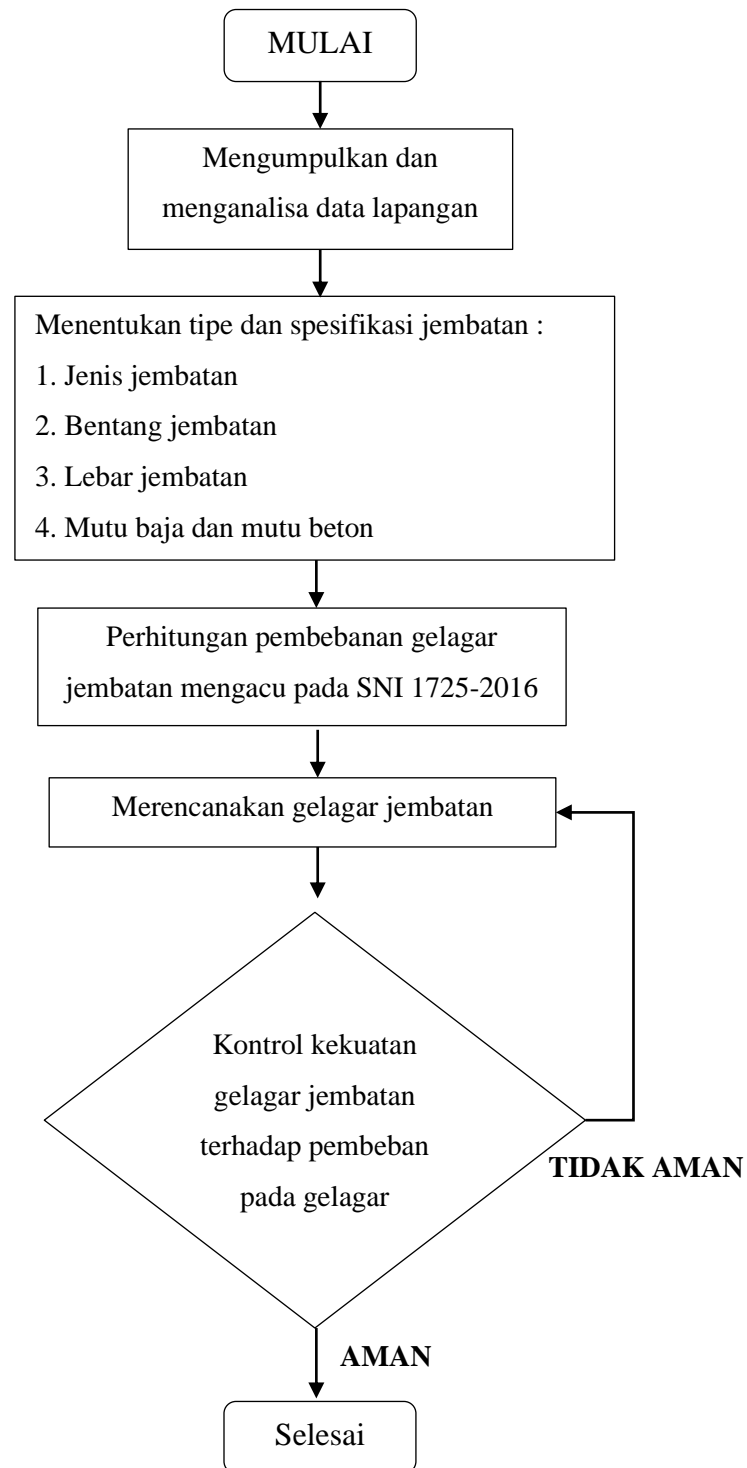
Gambar 4. 6 Potongan B-B Rencana Jembatan Tukad Yeh Unda Bali

4.4 Tahapan Perencanaan

Tahapan Perencanaan Jembatan Tukad Yeh Unda adalah sebagai berikut.

1. Mengumpulkan dan menganalisis data lapangan
2. Menentukan tipe dan spesifikasi jembatan
3. Merencanakan gelagar jembatan bentang 60 m
4. Menggambar detail jembatan Pusat Kebudayaan Bali
5. Kesimpulan
6. Selesai

Pada perencanaan struktur atas jembatan ini hanya merencanakan gelagar jembatan, karena hanya terdapat satu bangunan struktural yaitu gelagar jembatan. sedangkan pelat lantai kendaraan dianggap sebagai beban yang bekerja pada gelagar, dan pada tahapan perencanaan gelagar jembatan ini dilakukan kontrol kekuatan gelagar jembatan terhadap beban yang bekerja pada jembatan. karena terdapat berbagai macam beban yang dipikul oleh gelagar jembatan. Bagan alir (*flow chart*) perencanaan Jembatan Tukad Yeh Unda dapat dilihat pada gambar 4.7 berikut.



Gambar 4. 7 Flow Chart Perencanaan Jembatan Tukad Yeh Unda Bali

Tabel 4. 2 Rencana Pengerjaan Tugas Akhir

No	Tahap Penelitian	Waktu (jam)	Bobot (%)	Waktu Pelaksanaan 2022-2023																																	
				Bulan ke-																																	
				1				2				3				4				5				6				7				8					
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4		
1	Penyusunan Topik Judul Penelitian	4	3,01	1,50	1,50																																
2	Konsultasi Topik Penelitian	2	1,50	0,75	0,75																																
3	Penyusunan BAB 1	5	3,76		1,88	1,88																															
4	Penyusunan BAB 2	9	6,77			2,26	2,26	2,26																													
5	Penyusunan BAB 3	13	9,77					3,26	3,26	3,26																											
6	Penyusunan BAB 4	9	6,77							2,26	2,26	2,26																									
7	Konsultasi Proposal Tugas akhir	10	7,52								1,88	1,88	1,88	1,88																							
8	Pengumpulan Data	10	7,52										1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25																		
9	Analisis Data	15	11,28														2,82	2,82	2,82	2,82																	
10	Penyusunan BAB 5	35	26,32																		6,58	6,58	6,58	6,58													
11	Penyusunan BAB 6	7	5,26																					1,75	1,75	1,75											
12	konsultasi BAB 5-6	6	4,51																						1,13	1,13	1,13	1,13									
13	Penyusunan Tahap Akhir	4	3,01																									1,0025	1,003	1,00							
14	Konsultasi Akhir Tugas Akhir	4	3,01																														0,75	0,75	0,75	0,75	
	Jumlah	133	100	1,50	3,76	6,39	10,53	12,78	18,30	21,55	27,07	31,20	35,34	37,22	40,35	41,60	42,86	44,11	45,36	49,44	52,26	55,08	64,47	71,05	77,63	85,96	88,85	91,73	92,86	94,99	95,99	97,74	98,50	99,25	100		
	Kumulatif			1,50	3,76	6,39	10,53	12,78	18,30	21,55	27,07	31,20	35,34	37,22	40,35	41,60	42,86	44,11	45,36	49,44	52,26	55,08	64,47	71,05	77,63	85,96	88,85	91,73	92,86	94,99	95,99	97,74	98,50	99,25	100		

BAB 5

PERHITUNGAN DESAIN

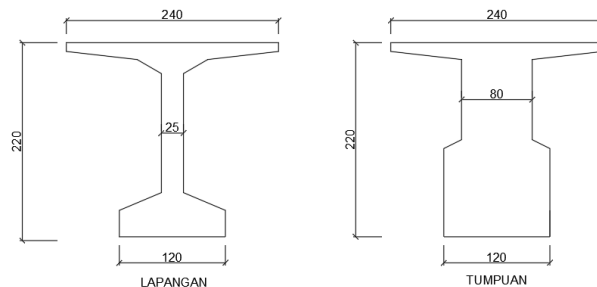
5.1 Tinjauan Umum

Desain jembatan Tukad Yeh Unda pada penelitian ini di rancang menggunakan PC *Bulb-tee girder*. Analisis desain dilakukan menggunakan program Ms. Excel dan mengacu pada peraturan pembebanan jembatan SNI 1725-2016 dan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan no 02/M/BM/2021.

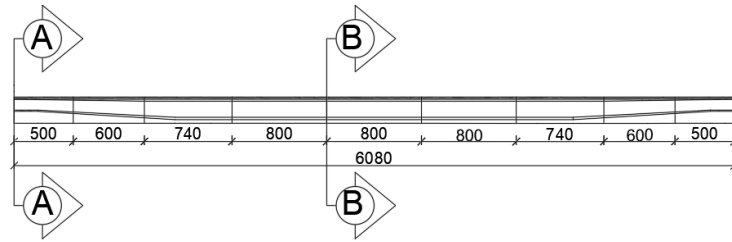
Dalam penelitian ini hanya mencakup desain struktur atas jembatan. Pada struktur atas jembatan ini pelat kendaraan dan pelat trotoar dianggap sebagai beban yang membebani gelagar jembatan, karena tidak bersifat struktural. Jadi, hanya terdapat satu bangunan yang bersifat struktural pada struktur atas yaitu gelagar jembatan. Oleh karena itu perhitungan perencanaan dimulai dari perencanaan gelagar jembatan.

5.2 Perencanaan Gelagar Jembatan

Gelagar yang digunakan pada jembatan Tukad Yeh Unda yaitu PC Bulb-tee girder dengan tinggi penampang 220 cm. gambar PC Bulb-tee girder dapat dilihat pada gambar 5.1 dan 5.2 dibawah ini.



Gambar 5. 1 Tampak Depan Penampang Gelagar



Gambar 5. 2 Tampak Samping Gelagar *PC Bulb-tee* H-220cm

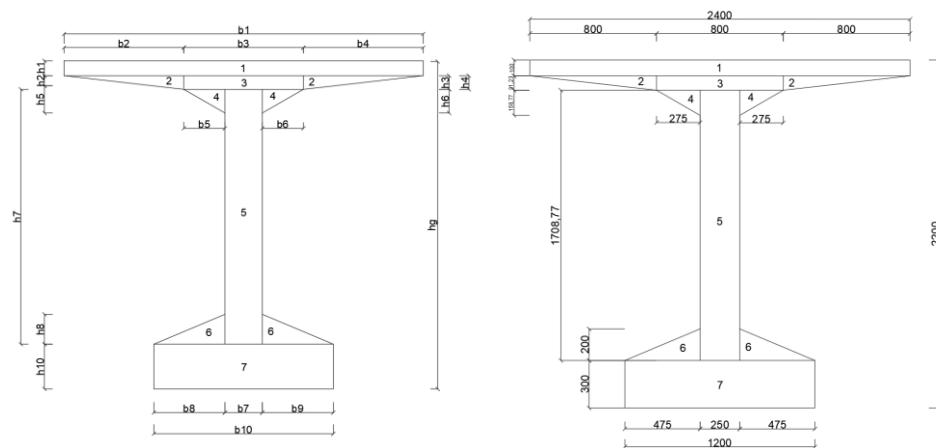
5.2.1 Perhitungan Modulus Penampang *PC Bul-tee Girder* H-220cm

Tegangan lentur yang bekerja pada penampang gelagar menghasilkan tegangan yang berbeda antara bagian atas dan bagian bawah penampang. Maka, muncul modulus penampang yang disebabkan oleh tegangan lentur penampang. Bagian atas dibatasi oleh titik berat penampang ke sisi ter atas penampang, sedangkan bagian bawah dibatasi oleh titik berat penampang ke sisi ter bawah penampang.

1. Gelagar prategang

Sebelum dilakukan pengecoran pelat lantai, gelagar bersifat nonkomposit.

Untuk mempermudah perhitungan gelagar *PC Bulb-tee girder* dibagi menjadi beberapa bangunan seperti gambar 5.3 dibawah ini.



Gambar 5. 3 Pembagian Bagian Penampang Gelagar *PC Bulb-tee Girder*

a. Titik berat gelagar

Contoh perhitungan untuk bangunan 1 pada penampang *PC Bulb-tee girder* di atas.

$$\text{Tinggi gelagar} \quad (h_g) = 2,2 \text{ m}$$

$$\text{Lebar bagian 1} \quad (b_1) = 2,4 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi bagian 1} \quad (h_1) = 0,1 \text{ m}$$

Luas bagian 1 (A_1)

$$A_1 = b_1 \cdot h_1$$

$$A_1 = 2,4 \cdot 0,1$$

$$A_1 = 0,24 \text{ m}^2$$

Jarak titik berat tampang 1 terhadap alas gelagar (y_i)

$$y_i = h_g - 0,5 \cdot h_1$$

$$y_i = 2,2 - 0,5 \cdot 0,1$$

$$y_i = 2,150 \text{ m}$$

Statis momen tampang 1

$$= A_i \cdot y_i$$

$$= 0,24 \cdot 2,150$$

$$= 0,516 \text{ m}^3$$

Perhitungan bagian penampang lainnya dihitung dengan cara yang sama seperti perhitungan diatas, sehingga didapatkan rekap hasil perhitungan statis momen seperti pada tabel 5.1 dibawah ini.

Tabel 5. 1 Rekapitulasi Perhitungan Statis Momen Penampang Gelagar

No	Dimensi		Luas Tampang	Jarak Titik Berat Tampang Terhadap Alas	Statis Momen
	Lebar	Tinggi			
	b_i	h_i	A_i	y_i	$A_i \cdot y_i$
	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m ³)
1	2,4	0,1	0,240	2,150	0,516
2	0,8	0,09123	0,073	2,070	0,151
3	0,8	0,09123	0,073	2,054	0,150
4	0,275	0,15877	0,044	1,956	0,085
5	0,25	1,70877	0,427	1,154	0,493
6	0,475	0,2	0,095	0,367	0,035
7	1,2	0,3	0,360	0,150	0,054
TOTAL			1,31182		1,430

Dari data yang didapat dari tabel diatas, maka titik berat gelagar dapat dicari dengan perhitungan di bawah ini :

Jarak titik berat gelagar ke serat terbawah gelagar (y_b)

$$y_b = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}$$

$$y_b = \frac{1,430}{1,31182}$$

$$y_b = 1,0904 \text{ m}$$

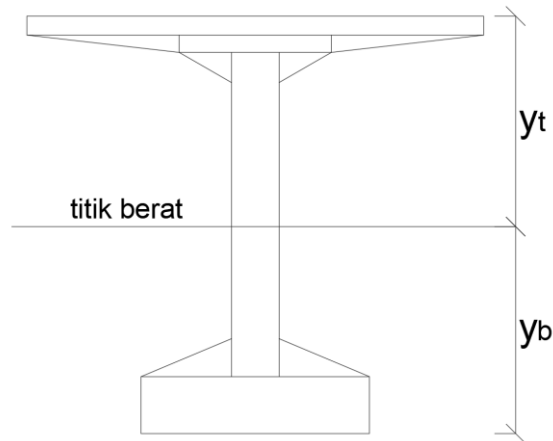
Jarak titik berat gelagar ke serat teratas gelagar (y_t)

$$y_t = h - y_b$$

$$y_t = 2,2 - 1,09$$

$$y_t = 1,1096 \text{ m}$$

Ilustrasi letak titik berat, jarak titik berat terhadap alas gelagar, dan jarak titik berat terhadap sera tatas gelagar dapat dilihat pada gambar 5.4 dibawah ini.



Gambar 5. 4 ilustrasi letak titik berat gelagar

b. Momen inersia gelagar

Berikut adalah perhitungan momen inersia pada tampang 1 :

Inersia momen tampang 1 (I_{x1}^0)

$$I_{x1}^0 = \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h_1^3$$

$$I_{x1}^0 = \frac{1}{12} \cdot 2,4 \cdot 0,1^3$$

$$I_{x1}^0 = 0,0002 \text{ m}^4$$

Luas tampang 1 (A_1)

$$A_1 = b_1 \cdot h_1$$

$$A_1 = 2,4 \cdot 0,1$$

$$A_1 = 0,24 \text{ m}^2$$

Jarak titik berat tampang 1 terhadap titik berat (y_i)

$$y_i = y_t - 0,5 \cdot h_1$$

$$y_i = 1,1096 - 0,5 \cdot 0,1$$

$$y_i = 1,0596 \text{ m}$$

Inersia momen tampang 1 ($A_i \cdot y_i^2$)

$$\begin{aligned}
 &= A_i \cdot y_i^2 \\
 &= 0,24 \cdot 1,0596^2 \\
 &= 0,2694 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Perhitungan bagian penampang lainnya dihitung dengan cara yang sama seperti perhitungan diatas, sehingga di dapatkan rekap hasil perhitungan inersia penampang seperti pada tabel 5.2 dibawah ini.

Tabel 5. 2 Rekapitulasi Perhitungan Inersia Momen

No	Inersia Tampang	Luas Tampang	Jarak Titik Berat Tampang Terhadap Titik Berat Gelagar	Inersia Momen
	I_x^0	A_i	y_i	$A_i \cdot y_i^2$
	m^4	m^2	m	m^4
1	0,0002	0,240	1,060	0,269
2	0,000051	0,073	0,979	0,070
3	0,000051	0,073	0,964	0,068
4	0,000092	0,044	0,865	0,033
5	0,103946	0,427	0,064	0,002
6	0,000317	0,095	0,724	0,050
7	0,0027	0,360	0,940	0,318
Jumlah	0,1074	1,31182		0,810

Momen inersia terhadap titik berat gelagar (I_g)

$$I_g = I_x^0 + A \cdot y^2$$

$$I_g = 0,1074 + 0,810$$

$$I_g = 0,9172 \text{ m}^4$$

Modulus elastisitas penampang serat bawah gelagar (S_b)

$$S_b = \frac{I_g}{y_b}$$

$$S_b = \frac{0,9172}{1,0904}$$

$$S_b = 0,84116 \text{ m}^3$$

Modulus elastisitas penampang serat atas gelagar (S_t)

$$S_t = \frac{I_g}{y_t}$$

$$S_t = \frac{0,9175}{1,1096}$$

$$S_t = 0,8268 \text{ m}^3$$

5.2.2 Pembebanan Gelagar

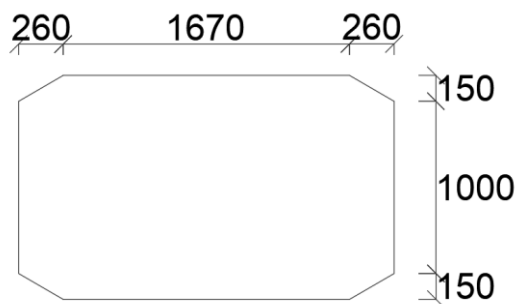
Pembebanan yang dihitung pada gelagar yaitu berat sendiri (MS), beban mati tambahan (MA), beban lajur “D” (TD), gaya rem (TB), pejalan kaki (TP), dan beban angin (EW).

1. Berat sendiri (MS)

Menurut SNI 1725:2016 pasal 7.2, berat sendiri adalah berat bagian tersebut dan elemen-elemen struktural lain yang dipikulnya. Berat sendiri gelagar terdiri dari berat diafragma, berat gelagar prategang, dan berat pelat lantai kendaraan. Untuk menghitung berat sendiri pada gelagar hanya perlu dilakukan pada salah satu gelagar yang menerima beban paling maksimum, yaitu gelagar yang terletak di tengah bentang jembatan.

a. Berat Diafragma

Berikut detail dimensi diafragma pada *PC bulb-tee girder* dapat dilihat pada gambar 5.5 dibawah ini.



Gambar 5. 5 Detail Dimensi Diafragma

Luas penampang diafragma (A_{dp})	= 2,769 m ²
Tebal penampang (t_{dp})	= 0,4 m
Berat jenis beton (Y_c)	= 25 kN/m ³
Jumlah diafragma (n_{dp})	= 1 buah
Panjang bentang (L)	= 60,8 m
Berat diafragma (W_{dp})	

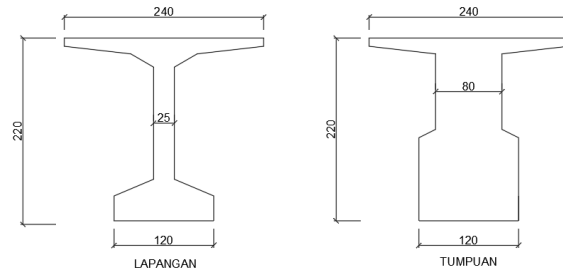
$$W_{dp} = A_{dp} \cdot t_{dp} \cdot \frac{n_{dp}}{L} \cdot Y_c$$

$$W_{dp} = 2,769 \cdot 0,4 \cdot \frac{1}{60,8} \cdot 25$$

$$W_{dp} = 0,4555 \text{ kN/m}$$

b. Berat gelagar

Berikut detail penampang gelagar seperti pada gambar 5.6 dibawah ini.



Gambar 5. 6 Penampang Gelagar Pada Bagian Tumpuan dan Lapangan

$$\text{Panjang gelagar prategang (} L \text{)} = 60,8$$

$$\text{Luas penampang lapangan (} A_{lap} \text{)} = 1,3118 \text{ m}^2$$

$$\text{Panjang penampang lapangan (} L_{lap} \text{)} = 33,6 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume penampang lapangan (} V_{lap} \text{)} &= A_{lap} \cdot L_{lap} \\ &= 1,3118 \cdot 33,6 \\ &= 44,077 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume penampang tumpuan (} V_{tump} \text{)} &= A_{tump} \cdot L_{tump} \\ &= 1,7978 \cdot 27,2 \\ &= 48,9021 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Berat jenis beton prategang (} Y_c \text{)} = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Berat gelagar prategang (} W \text{)} &= \sum V \cdot Y_c \\ &= (V_{tump} + V_{lap}) \cdot Y_c \\ &= (44,077 + 48,9021) \cdot Y_c \\ &= 2324,485 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{Berat gelagar ekivalen (} W_g \text{)} = \frac{W}{L}$$

$$= \frac{2324,485}{60,8}$$

$$= 38,2316 \text{ kN/m}$$

c. Berat pelat lantai kendaraan

$$\begin{aligned} \text{Lebar pelat lantai } (b_s) &= 2,5 \text{ m} \\ \text{Tebal pelat lantai } (h_s) &= 0,15 \text{ m} \\ \text{Berat volume beton } (Y_c) &= 25 \text{ kN/m}^3 \\ \text{Berat pelat lantai } (W_s) &= b_s \cdot h_s \cdot Y_c \\ &= 2,5 \cdot 0,15 \cdot 25 \\ &= 9,375 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, didapatkan rekapitulasi perhitungan berat sendiri gelagar dapat dilihat pada tabel 5.3 dibawah ini.

Tabel 5. 3 Rekapitulasi Perhitungan Berat Sendiri Gelagar

No	Jenis beban berat sendiri	Berat
		W
		(kN/m)
1	Pelat lantai	9,375
2	Gelagar	38,2316
3	Diafragma	0,4555
TOTAL		48,0621

2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan adalah beban akibat elemen yang bersifat nonstruktural pada jembatan. Pada pembebanan gelagar, beban mati tambahan yaitu berupa beban aspal, beban barrier, beban air hujan, dan beban trotoar. Beban air hujan yaitu beban yang diasumsikan apabila terdapat air menggenang akibat adanya penyumbatan pada sistem drainase.

a. Beban barrier

Beban barrier dan trotoar dianggap sebagai beban merata yang dihitung dengan membagi berat barrier ke semua gelagar agar mempermudah perhitungan, dan juga karena jembatan cukup kaku sehingga deformasi yang terjadi bisa seragam tidak hanya di tempat tertentu sehingga beban bisa di distribusikan secara merata.

$$\text{Luas permukaan barrier } (A_{br}) = 0,3 \text{ m}^2$$

$$\text{Tebal barrier } (t_{br}) = 60,8 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume barrier } (V_b) &= A_{br} \cdot t_{br} \\ &= 0,3 \cdot 60,8 \\ &= 18,24 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Jumlah } (n_{br}) = 2 \text{ buah}$$

$$\begin{aligned} \text{Volume total } (V_{br}) &= V_b \cdot n_{br} \\ &= 18,24 \cdot 2 \\ &= 36,48 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Berat jenis beton } (Y_c) = 25 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Jumlah gelagar } (n_g) = 4 \text{ buah}$$

$$\text{Panjang bentang } (L) = 60,8 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban barrier } (W_b) &= \frac{V_{br} \cdot Y_c}{L} \\ &= \frac{36,48 \cdot 25}{60,8} \\ &= 15 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban barrier pada satu gelagar } (W_{br}) &= \frac{W_b}{n_g} \\ &= \frac{15}{4} \\ &= 3,75 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b. Beban trotoar

$$\begin{aligned}
 \text{Luas permukaan trotoar } (A_{tr}) &= 0,15 \text{ m}^2 \\
 \text{Panjang trotoar } (t_{tr}) &= 60,8 \text{ m} \\
 \text{Volume trotoar } (V_t) &= A_{tr} \cdot t_{tr} \\
 &= 0,15 \cdot 60,8 \\
 &= 9,12 \text{ m}^3 \\
 \text{Jumlah trotoar } (n_{tr}) &= 2 \text{ buah} \\
 \text{Volume total trotoar } (V_{tr}) &= V_t \cdot n_{tr} \\
 &= 9,12 \cdot 2 \\
 &= 18,24 \text{ m}^3 \\
 \text{Berat jenis beton } (Y_c) &= 25 \text{ kN/m}^3 \\
 \text{Jumlah gelagar } (n_g) &= 4 \text{ buah} \\
 \text{Panjang bentang } (L) &= 60,8 \\
 \text{Beban trotoar } (W_t) &= \frac{V_{tr} \cdot Y_c}{L} \\
 &= \frac{18,24 \cdot 25}{60,8} \\
 &= 7,5 \text{ kN/m} \\
 \text{Beban trotoar pada satu gelagar } (W_{tr}) &= \frac{W_t}{n_g} \\
 &= \frac{7,5}{4} \\
 &= 1,875 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

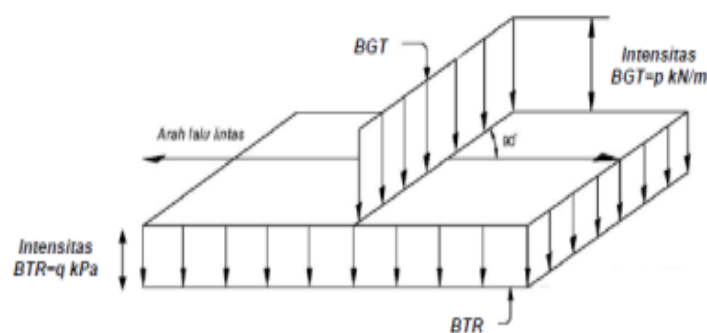
Perhitungan beban mati tambahan gelagar dapat dilihat pada tabel 5.4 dibawah ini.

Tabel 5. 4 Perhitungan Beban Mati Tambahan Gelagar

No	Jenis Beban	Lebar	Tebal	Luas	Berat Volume	Berat
		b_i	h_i	A_i	Y_i	w
		(m)	(m)	(m ²)	(kN/m ³)	(kN/m)
						$A_i \cdot Y_i$
1	Lapisan aspal	2,5	0,05	0,125	22	2,75
2	Air hujan	2,5	0,05	0,125	9,8	1,225
3	<i>Barrier</i>					3,75
4	Trotoar					1,875
TOTAL						9,6

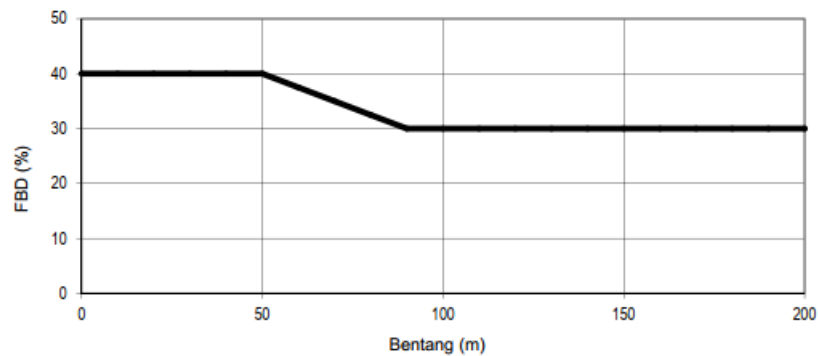
3. Beban Lajur “D” (*TD*)

Beban lajur “D” adalah beban yang bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan satu iring-iringan kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur “D” yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri. Ilustrasi pembebanan lajur “D” dapat dilihat pada gambar 5.7 dibawah ini.

**Gambar 5. 7 Pembebanan Lajur “D”**

(Sumber : SNI 1725-2016)

Beban *BGT* merupakan beban panjang yang harus dikalikan dengan faktor beban dinamis (*FBD*). Hal ini karena beban hidup jembatan adalah beban dinamis, namun dalam perhitungannya menggunakan metode statis, sehingga perlu dikalikan dengan *FBD*. Sedangkan beban *BTR* merupakan beban luasan sehingga tidak perlu dikalikan dengan *FBD*. Nilai *FBD* dapat ditentukan dengan grafik pada gambar 5.8 dibawah ini.



Gambar 5. 8 Faktor Beban Dinamis untuk Pembebanan Lajur “D”

(Sumber : SNI 1725-2016)

Berikut perhitungan beban lajur “D” untuk PC Bulb-tee girder.

$$\text{Panjang gelagar } (L) = 60,8 \text{ m}$$

$$\text{Jarak antar gelagar } (S_g) = 2,5 \text{ m}$$

Beban terbagi rata (q_{BTR})

$$q_{BTR} = 9 \cdot \left(0,5 + \frac{15}{L}\right)$$

$$q_{BTR} = 9 \cdot \left(0,5 + \frac{15}{60,8}\right)$$

$$q_{BTR} = 6,7203 \text{ kN/m}^2$$

Beban merata pada gelagar (W_{BTR})

$$W_{BTR} = q_{BTR} \cdot S_g$$

$$W_{BTR} = 6,7203 \cdot 2,5$$

$$W_{BTR} = 16,8 \text{ kN/m}$$

Beban garis terpusat (BGT) = 49 kN/m

Faktor beban dinamis (FBD), untuk panjang bentang $50 < L < 90$ maka dipakai :

$$FBD = 0,4 - 0,0025 \cdot (L - 50)$$

$$FBD = 0,4 - 0,0025 \cdot (60,8 - 50)$$

$$FBD = 0,373$$

Beban terpusat pada balok (P_{BGT})

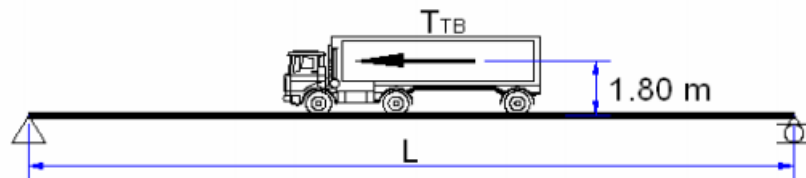
$$P_{BGT} = (1 + FBD) \cdot BGT \cdot s_g$$

$$P_{BGT} = (1 + 0,373) \cdot 49 \cdot 2,5$$

$$P_{BGT} = 168,1925 \text{ kN}$$

4. Gaya Rem (T_B)

Menurut SNI 1725:2016 nilai gaya rem harus diambil dari nilai terbesar antara 25% dari berat gandar truk desain atau 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata BTR . Gaya rem tersebut ditempatkan di semua lajur rencana yang dimuati dan diasumsikan bekerja pada jarak 1,8 m di atas permukaan jalan secara horizontal. Ilustrasi pembebanan akibat gaya rem dapat dilihat pada gambar 5.9 Dibawah ini.



Gambar 5. 9 Pembebanan Akibat Gaya Rem

Beban gandar belakang (P_1) = 225 kN

$$\text{Beban gandar tengah } (P_2) = 225 \text{ kN}$$

$$\text{Beban gandar depan } (P_3) = 50 \text{ kN}$$

Dari ketiga nilai beban gandar, dipilih nilai yang paling maksimum. Jadi nilai beban gandar (P) adalah 225 kN

$$\text{Berat truk rencana } (P_T) = 500 \text{ kN}$$

$$\text{Beban lajur terbagi rata } (q_{BTR}) = 6,7203 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Panjang bentang } (L) = 60,8 \text{ m}$$

$$\text{Jumlah lajur } (n_L) = 2$$

$$\text{Jumlah gelagar } (n_g) = 4$$

$$\text{Lebar jalan } (W_r) = 7 \text{ m}$$

Beban BTR yang bekerja di semua lajur P_{BTR}

$$P_{BTR} = q_{BTR} \cdot W_r \cdot L$$

$$P_{BTR} = 6,7203 \cdot 7 \cdot 60,8$$

$$P_{BTR} = 2860,2 \text{ kN}$$

Gaya rem (TB)

Gaya rem dipilih dari nilai terbesar antara TB_1 dan TB_2

$TB_1 = 25\%$ dari berat gandar truk desain

$$TB_1 = 25\% \cdot \frac{n_L \cdot W_T}{n_g}$$

$$TB_1 = 25\% \cdot \frac{2 \cdot 225}{4}$$

$$TB_1 = 28,125 \text{ kN/m}$$

Atau

$TB_2 = 5\%$ dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata *BTR*

$$TB_2 = 5\% \cdot \left(\frac{P_T \cdot n_L + P_{BTR}}{n_g} \right)$$

$$TB_2 = 5\% \cdot \left(\frac{500 \cdot 2 + 2860,2}{4} \right)$$

$$TB_2 = 48,2525 \text{ kN}$$

Berdasarkan hasil diatas maka nilai TB yang dipakai adalah 48,2525 kN.

$$\text{Tebal aspal } (t_a) = 0,05 \text{ m}$$

$$\text{Titik berat balok komposit } (y_{icg}) = 1,0136 \text{ m}$$

Panjang lengan terhadap titik berat balok (y)

$$y = 1,8 + y_{icg} + t_a$$

$$y = 1,8 + 1,0136 + 0,05$$

$$y = 2,8636 \text{ m}$$

Beban momen akibat gaya rem (M)

$$M = TB \cdot y$$

$$M = 48,2525 \cdot 2,8636$$

$$M = 138,175 \text{ kNm}$$

5. Beban pejalan kaki (TP)

Menurut SNI 1725:2016 untuk trotoar yang memiliki lebar lebih dari 600 mm maka beban pejalan kaki sebesar 5 kN/m² harus diterapkan sepanjang trotoar.

$$\begin{aligned} \text{Jumlah trotoar } (n_{tr}) &= 2 \\ \text{Beban pejalan kaki } (W) &= 5 \text{ kN/m}^2 \\ \text{Lebar trotoar } (b_{tr}) &= 1 \text{ m} \\ \text{Panjang bentang } (L) &= 60,8 \text{ m} \\ \text{Jumlah gelagar } (n_g) &= 4 \end{aligned}$$

Beban pejalan kaki (TP)

$$TP = W \cdot b_{tr} \cdot n_{tr}$$

$$TP = 5 \cdot 1 \cdot 2$$

$$TP = 10 \text{ kN/m}$$

Beban yang diterima oleh tiap gelagar (W_{TP})

$$W_{TP} = \frac{TP}{n_g}$$

$$W_{TP} = \frac{10}{4}$$

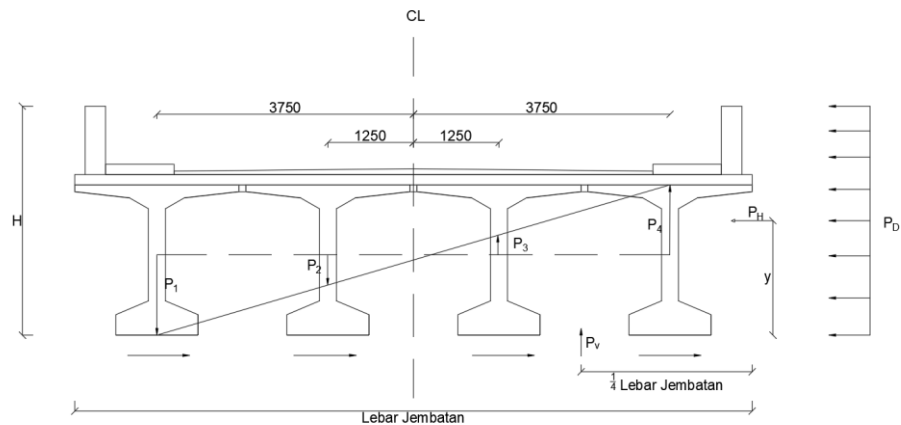
$$W_{TP} = 2,5 \text{ kN/m}$$

6. Beban Angin (EW)

Pembebanan akibat angin diasumsikan terdistribusi merata pada semua permukaan yang terekspos oleh angin. Pembebanan diambil tegak lurus arah angin.

a. Beban angin struktur (EW_s)

Beban angin struktur adalah beban akibat angin yang diterima oleh jembatan ketika jembatan dalam kondisi kosong tanpa kendaraan, atau beban angin yang hanya diterima oleh struktur jembatan saja. Beban angin struktur dapat diilustrasikan seperti pada gambar 5.10 dibawah ini.



Gambar 5. 10 Pembebanan Angin pada Struktur

Tekanan angin (P_D) seperti pada gambar 5.13 diilustrasikan bergerak dari arah kanan jembatan. Angin yang bergerak tersebut akan mengakibatkan tekanan secara horizontal (P_H) dan tekanan secara vertikal (P_V). Titik tangkap

Kecepatan gesekan angin (V_0) = 19,3 km/jam

Panjang gesekan di hulu jembatan (Z_0) = 2500 mm

Elevasi struktur (Z) = 10 m

Kecepatan angin rencana (V_B) = 126 km/jam

Kecepatan angin pada elevasi struktur (V_{10}) = 126 km/jam

Tekanan angin dasar (P_b) = 0,0024 MPa

Tinggi struktur atas (h_{ts}) = 3,35 m

Panjang bentang jembatan (L) = 60,8 m

Lebar jembatan (B) = 9,6 m

Kecepatan angin rencan pada elevasi rencana (V_{DZ})

$$V_{DZ} = 2,5 \cdot V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \cdot \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right)$$

$$V_{DZ} = 2,5 \cdot 19,3 \left(\frac{126}{126} \right) \cdot \ln \left(\frac{10}{2,5} \right)$$

$$V_{DZ} = 66,889 \text{ km/jam}$$

Tekanan angin rencana (P_D)

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

$$P_D = 0,0024 \left(\frac{66,889}{126} \right)^2$$

$$P_D = 0,67636 \text{ kN/m}^2$$

Luas kontak (A)

$$A = h_s \cdot L$$

$$A = 3,35 \cdot 60,8$$

$$A = 203,68 \text{ m}^2$$

Gaya horizontal (P_H)

$$P_H = P_D \cdot A$$

$$P_H = 0,6763 \cdot 203,68$$

$$P_H = 137,76 \text{ kN}$$

Gaya horizontal per meter bentang jembatan

$$\frac{P_H}{L} = \frac{137,76}{60,8}$$

$$\frac{P_H}{L} = 2,265 \text{ kN/m}$$

Berdasarkan SNI 1725:2016 pasal 9.6.1.1 maka gaya total beban angin tidak boleh kurang dari 4,4 kN/m. sehingga beban angin yang digunakan yaitu sebesar 4,4 kN/m. sehingga gaya horizontal nya yaitu

$$P_H = 4,4 \cdot L$$

$$P_H = 4,4 \cdot 60,8$$

$$P_H = 267,52 \text{ kN}$$

Titik tangkap (y)

$$y = \frac{1}{2} \cdot h_s$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot 3,35$$

$$y = 1,675 \text{ m}$$

Momen guling akibat gaya horizontal (M_H)

$$M_H = P_H \cdot y$$

$$M_H = 267,52 \cdot 1,675$$

$$M_H = 448,096 \text{ kNm}$$

Gaya tekan gelagar maksimum akibat gaya horizontal (P_{1H})

Untuk mencari nilai P_{1H} berdasarkan gambar 5.13 dilakukan dengan rumus berikut.

$$M = P \cdot y$$

Dimana

$$P_1; P_2 = \frac{a_2}{a_1} \cdot P_1; P_3 = \frac{a_3}{a_1} \cdot P_1; P_4 = P_1$$

Sehingga,

$$M = P_1 \cdot a_1 + P_2 \cdot a_2 + P_3 \cdot a_3 + P_4 \cdot a_4$$

$$M = P_1 \cdot a_1 + \frac{a_2}{a_1} \cdot P_1 \cdot a_2 + \frac{a_3}{a_1} \cdot P_1 \cdot a_3 + P_1 \cdot a_4$$

$$M = \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2}{a_1} \right) \cdot P_1$$

$$P_1 = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2} \right) \cdot M$$

$$P_{1H} = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2} \right) \cdot M_H$$

Dimana:

a_1 = jarak as gelagar 1 terhadap garis tengah jembatan

$$a_1 = 3,75 \text{ m}$$

a_2 = jarak as gelagar 2 terhadap garis tengah jembatan

$$a_2 = 1,25 \text{ m}$$

$a_3 =$ jarak as gelagar 3 terhadap garis tengah jembatan

$$a_3 = 1,25 \text{ m}$$

$a_4 =$ jarak as gelagar 4 terhadap garis tengah jembatan

$$a_4 = 3,75 \text{ m}$$

Nilai P_{1H} adalah sebagai berikut:

$$P_{1H} = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2} \right) \cdot M_H$$

$$P_{1H} = \left(\frac{3,75}{3,75^2 + 1,25^2 + 1,25^2 + 3,75^2} \right) \cdot 448,096$$

$$P_{1H} = 53,7715 \text{ kN}$$

Gaya vertikal (P_v)

$$P_v = 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot B \cdot L$$

$$P_v = 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot 9,6 \cdot 60,8$$

$$P_v = 0,5603 \text{ kN}$$

Momen guling akibat gaya vertikal (M_v)

$$M_v = \frac{1}{4} \cdot B \cdot P_v$$

$$M_v = \frac{1}{4} \cdot 9,6 \cdot 0,5603$$

$$M_v = 1,3448 \text{ kNm}$$

Gaya tekan gelagar maksimum akibat gaya vertikal (P_{1V})

$$P_{1V} = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2} \right) \cdot M_v$$

$$P_{1V} = \left(\frac{3,75}{3,75^2 + 1,25^2 + 1,25^2 + 3,75^2} \right) \cdot M_v$$

$$P_{IV} = 0,16138 \text{ kNm}$$

Gaya angin struktur (EW_s)

$$EW_s = P_{IH} + P_{IV}$$

$$EW_s = 53,7715 + 0,16138$$

$$EW_s = 53,9329 \text{ kN}$$

Beban merata akibat angin struktur (W_{EW_s})

$$W_{EW_s} = \frac{EW_s}{L}$$

$$W_{EW_s} = \frac{53,9329}{60,8}$$

$$W_{EW_s} = 0,88705 \text{ kN/m}$$

b. Beban angin kendaraan (EW_L)

Beban angin kendaraan adalah tekanan angin yang terjadi pada kendaraan sehingga kendaraan mengalami beban guling dengan sumbu putar pada garis tengah gandar truk tersebut. Akibat beban guling tersebut maka gandar truk akan mengalami gaya angkat dan daya tekan (W_{EW_L}). Menurut SNI 1725:2016, tekanan angin tersebut bekerja 1800 mm di atas permukaan jalan sebesar 1,46 N/mm

$$\text{Tekanan angin } (EW_L) = 1,46 \text{ kN/m}$$

$$\text{Titik tangkap } (y) = 1,8$$

$$\text{Jarak antar gandar } (x) = 1,75 \text{ m}$$

Beban merata akibat angin kendaraan (W_{EW_L})

$$\sum M = (W_{EW_L} \cdot 0,5 \cdot x) + (W_{EW_L} \cdot 0,5 \cdot x)$$

$$(EW_L \cdot y) = 2 \cdot (W_{EW_L} \cdot 0,5 \cdot x)$$

$$W_{EW_L} = \frac{EW_L \cdot y}{2 \cdot 0,5 \cdot x}$$

$$W_{EW_L} = \frac{1,46 \cdot 1,8}{2 \cdot 0,5 \cdot 1,75}$$

$$W_{EW_L} = 1,502 \text{ kN/m}$$

dari perhitungan diatas, didapatkan hasil rekapitulasi perhitungan pembebanan pada PC Bulb-tee girder dapat dilihat pada tabel 5.5 Dan tabel 5.6

Tabel 5. 5 Rekapitulasi Hasil Pembebanan pada PC Bulb-tee girder

Jenis pembebanan	Kode beban	W	P	M	Keterangan
		(kN/m)	(kN)	kNm	
Berat Sendiri	<i>MS</i>	48,0621	-	-	Beban merata
Beban Mati Tambahan	<i>MA</i>	9,6	-	-	Beban merata
Beban Lajur "D"	<i>TD</i>	16,8	168,1925	-	Beban merata, dan beban terpusat
Gaya Rem	<i>TB</i>	-	-	138,175	Beban momen
Beban Angin Struktur	<i>EW_s</i>	0,88705	-	-	Beban merata
Beban Angin Kendaraan	<i>EW_L</i>	1,502	-	-	Beban merata
Beban Pejalan Kaki	<i>TP</i>	2,5	-	-	Beban merata

Tabel 5. 6 Persamaan Perhitungan Momen dan Gaya Geser pada Jarak Tertentu

No	Jenis Beban	Persamaan Momen	Persamaan Gaya Geser
1	Berat sendiri	$M_x = \frac{1}{2} \cdot W_{MS} \cdot (L \cdot X - X^2)$	$V_x = W_{MS} \cdot \left(\frac{L}{2} - X\right)$
2	Mati tambahan	$M_x = \frac{1}{2} \cdot W_{MA} \cdot (L \cdot X - X^2)$	$V_x = W_{MA} \cdot \left(\frac{L}{2} - X\right)$
3	Lajur "D"	$M_x = \frac{1}{2} \cdot W_{TD} \cdot (L \cdot X - X^2) + \frac{1}{2} \cdot P_{TD}$	$V_x = W_{TD} \cdot \left(\frac{L}{2} - X\right) + \frac{1}{2} \cdot P_{TD}$
4	Gaya rem	$M_x = \frac{X}{L} \cdot M_{TB}$	$V_x = \frac{M_{TB}}{L}$
5	Angin struktur	$M_x = \frac{1}{2} \cdot W_{EW_s} \cdot (L \cdot X - X^2)$	$V_x = W_{EW_s} \cdot \left(\frac{L}{2} - X\right)$
6	Angin kendaraan	$M_x = \frac{1}{2} \cdot W_{EW_L} \cdot (L \cdot X - X^2)$	$V_x = W_{EW_L} \cdot \left(\frac{L}{2} - X\right)$
7	Pejalan kaki	$M_x = \frac{1}{2} \cdot W_{TP} \cdot (L \cdot X - X^2)$	$V_x = W_{TP} \cdot \left(\frac{L}{2} - X\right)$

Tabel 5. 7 Momen pada Gelagar Akibat Beban

Jarak	Momen Pada Gelagar Akibat Beban							
	x	Berat Sendiri	Mati Tambahan	Lajur "D"	Rem	Angin Struktur	Angin Kendaraan	Pejalan Kaki
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
1	1437,057	287,04	586,416	2,273	26,523	44,910	74,75	
2	2826,051	564,48	1156,033	4,545	52,159	88,318	147	
3	4166,984	832,32	1708,849	6,818	76,907	130,223	216,75	
4	5459,855	1090,56	2244,865	9,090	100,769	170,627	284	
5	6704,663	1339,20	2764,081	11,363	123,743	209,529	348,75	
6	7901,409	1578,24	3266,498	13,636	145,831	246,929	411	
7	9050,093	1807,68	3752,114	15,908	167,032	282,827	470,75	
8	10150,716	2027,52	4220,930	18,181	187,345	317,222	528	
9	11203,276	2237,76	4672,946	20,454	206,771	350,116	582,75	
10	12207,773	2438,40	5108,163	22,726	225,311	381,508	635	
11	13164,209	2629,44	5526,579	24,999	242,963	411,398	684,75	
12	14072,583	2810,88	5928,195	27,271	259,728	439,786	732	
13	14932,894	2982,72	6313,011	29,544	275,606	466,671	776,75	
14	15745,144	3144,96	6681,028	31,817	290,598	492,055	819	
15	16509,331	3297,60	7032,244	34,089	304,702	515,937	858,75	
16	17225,457	3440,64	7366,660	36,362	317,919	538,317	896	
17	17893,520	3574,08	7684,276	38,634	330,249	559,195	930,75	
18	18513,521	3697,92	7985,093	40,907	341,692	578,570	963	
19	19085,460	3812,16	8269,109	43,180	352,248	596,444	992,75	
20	19609,337	3916,80	8536,325	45,452	361,916	612,816	1020	
21	20085,152	4011,84	8786,741	47,725	370,698	627,686	1044,75	
22	20512,904	4097,28	9020,358	49,998	378,593	641,054	1067	
23	20892,595	4173,12	9237,174	52,270	385,601	652,919	1086,75	
24	21224,223	4239,36	9437,190	54,543	391,721	663,283	1104	
25	21507,790	4296,00	9620,406	56,815	396,955	672,145	1118,75	
26	21743,294	4343,04	9786,823	59,088	401,301	679,505	1131	
27	21930,736	4380,48	9936,439	61,361	404,761	685,363	1140,75	
28	22070,116	4408,32	10069,255	63,633	407,333	689,718	1148	
29	22161,434	4426,56	10185,271	65,906	409,019	692,572	1152,75	
30	22204,690	4435,20	10284,488	68,178	409,817	693,924	1155	
30,4	22208,535	4435,97	10319,470	69,088	409,888	694,044	1155,2	

Tabel 5. 8 Gaya Geser pada Gelagar Akibat Beban

Jarak x (m)	Gaya Geser pada Gelagar Akibat Beban						
	Berat Sendiri (kNm)	Mati Tambahhan (kNm)	Lajur "D" (kNm)	Rem (kNm)	Angin Struktur (kNm)	Angin Kendaraan (kNm)	Pejalan Kaki (kNm)
1	1413,026	282,24	578,0163	2,272615	26,07927	44,1588	73,5
2	1364,964	272,64	561,2163	2,272615	25,19222	42,6568	71
3	1316,902	263,04	544,4163	2,272615	24,30517	41,1548	68,5
4	1268,839	253,44	527,6163	2,272615	23,41812	39,6528	66
5	1220,777	243,84	510,8163	2,272615	22,53107	38,1508	63,5
6	1172,715	234,24	494,0163	2,272615	21,64402	36,6488	61
7	1124,653	224,64	477,2163	2,272615	20,75697	35,1468	58,5
8	1076,591	215,04	460,4163	2,272615	19,86992	33,6448	56
9	1028,529	205,44	443,6163	2,272615	18,98287	32,1428	53,5
10	980,4668	195,84	426,8163	2,272615	18,09582	30,6408	51
11	932,4047	186,24	410,0163	2,272615	17,20877	29,1388	48,5
12	884,3426	176,64	393,2163	2,272615	16,32172	27,6368	46
13	836,2805	167,04	376,4163	2,272615	15,43467	26,1348	43,5
14	788,2184	157,44	359,6163	2,272615	14,54762	24,6328	41
15	740,1563	147,84	342,8163	2,272615	13,66057	23,1308	38,5
16	692,0942	138,24	326,0163	2,272615	12,77352	21,6288	36
17	644,0321	128,64	309,2163	2,272615	11,88647	20,1268	33,5
18	595,97	119,04	292,4163	2,272615	10,99942	18,6248	31
19	547,9079	109,44	275,6163	2,272615	10,11237	17,1228	28,5
20	499,8458	99,84	258,8163	2,272615	9,22532	15,6208	26
21	451,7837	90,24	242,0163	2,272615	8,33827	14,1188	23,5
22	403,7216	80,64	225,2163	2,272615	7,45122	12,6168	21
23	355,6595	71,04	208,4163	2,272615	6,56417	11,1148	18,5
24	307,5974	61,44	191,6163	2,272615	5,67712	9,6128	16
25	259,5353	51,84	174,8163	2,272615	4,79007	8,1108	13,5
26	211,4732	42,24	158,0163	2,272615	3,90302	6,6088	11
27	163,4111	32,64	141,2163	2,272615	3,01597	5,1068	8,5
28	115,349	23,04	124,4163	2,272615	2,12892	3,6048	6
29	67,28694	13,44	107,6163	2,272615	1,24187	2,1028	3,5
30	19,22484	3,84	90,81625	2,272615	0,35482	0,6008	1
30,4	0	0	84,09625	2,272615	0	0	0

Dari tabel 5.7 dan tabel 5.8 didapatkan nilai kombinasi beban pada jembatan dengan faktor beban berdasarkan SNI 1725-2016 seperti pada tabel 3.11. dengan kombinasi sebagai berikut.

$$\text{Kuat I} = 1,2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1,8 \text{ TD} + 1,8 \text{ TP}$$

$$\text{Kuat II} = 1,2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1,4 \text{ TD} + 1,4 \text{ TB} + 1,4 \text{ TP}$$

$$\text{Kuat III} = 1,2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 1,4 \text{ Ews}$$

$$\text{Kuat IV} = 1,2 \text{ MS} + 2 \text{ MA}$$

$$\text{Kuat V} = 1,2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 0,4 \text{ Ews} + 1 \text{ Ewl}$$

$$\text{Ekstrem I} = 1,2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 0,3 \text{ TD} + 0,3 \text{ TB} + 0,3 \text{ TP}$$

$$\text{Ekstrem II} = 1,2 \text{ MS} + 2 \text{ MA} + 0,5 \text{ TD} + 0,5 \text{ TB} + 0,5 \text{ TP}$$

Dari perhitungan combo beban diatas maka didapatkan hasil perhitungan seperti pada tabel di bawah ini.

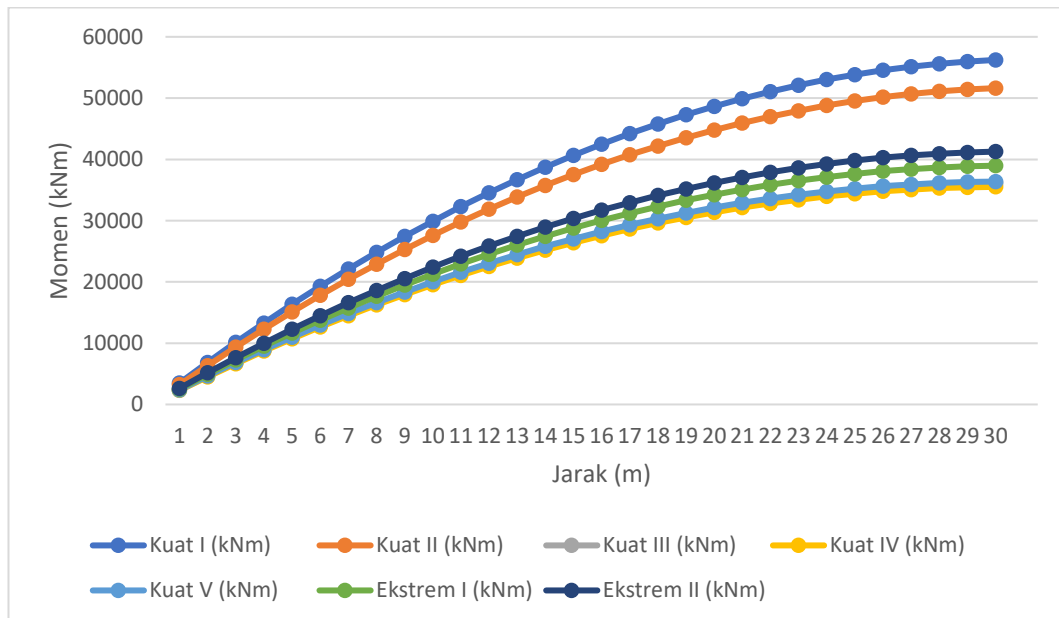
Tabel 5. 9 Kombinasi Pembebanan untuk Momen Akibat Beban pada Gelagar

Jarak x (m)	Kombinasi Pembebanan						
	Kuat I (kNm)	Kuat II (kNm)	Kuat III (kNm)	Kuat IV (kNm)	Kuat V (kNm)	Ekstrem I (kNm)	Ekstrem II (kNm)
1	3492,738	3227,363	2335,68	2298,548	2354,067	2497,5798	2630,2676
2	6873,862	6350,831	4593,244	4520,222	4629,403	4912,4951	5174,0106
3	10143,37	9370,404	6772,691	6665,021	6826,007	7244,7459	7631,2292
4	13301,27	12286,08	8874,022	8732,945	8943,88	9494,3321	10001,923
5	16347,55	15097,87	10897,24	10724	10983,02	11661,254	12286,093
6	19282,21	17805,76	12842,33	12638,17	12943,43	13745,511	14483,738
7	22105,26	20409,75	14709,32	14475,47	14825,11	15747,104	16594,858
8	24816,7	22909,85	16498,18	16235,9	16628,06	17666,032	18619,454
9	27416,52	25306,06	18208,93	17919,45	18352,28	19502,296	20557,526
10	29904,73	27598,37	19841,56	19526,13	19997,76	21255,895	22409,072
11	32281,32	29786,79	21396,08	21055,93	21564,51	22926,829	24174,095
12	34546,3	31871,31	22872,48	22508,86	23052,54	24515,099	25852,593
13	36699,66	33851,94	24270,76	23884,91	24461,83	26020,705	27444,566
14	38741,41	35728,67	25590,93	25184,09	25792,39	27443,646	28950,015
15	40671,55	37501,51	26832,98	26406,4	27044,22	28783,923	30368,939
16	42490,07	39170,46	27996,91	27551,83	28217,31	30041,535	31701,339
17	44196,97	40735,51	29082,73	28620,38	29311,68	31216,482	32947,214
18	45792,26	42196,66	30090,43	29612,07	30327,31	32308,765	34106,565
19	47275,94	43553,93	31020,02	30526,87	31264,22	33318,383	35179,391
20	48648	44807,29	31871,49	31364,8	32122,39	34245,337	36165,693
21	49908,45	45956,76	32644,84	32125,86	32901,83	35089,627	37065,47
22	51057,28	47002,34	33340,08	32810,05	33602,54	35851,252	37878,723
23	52094,5	47944,03	33957,19	33417,35	34224,51	36530,212	38605,451
24	53020,11	48781,81	34496,2	33947,79	34767,76	37126,508	39245,654
25	53834,1	49515,71	34957,08	34401,35	35232,27	37640,139	39799,334
26	54536,47	50145,71	35339,85	34778,03	35618,06	38071,106	40266,488
27	55127,23	50671,81	35644,51	35077,84	35925,11	38419,408	40647,118
28	55606,38	51094,02	35871,05	35300,78	36153,43	38685,046	40941,224
29	55973,91	51412,34	36019,47	35446,84	36303,02	38868,019	41148,805
30	56229,83	51626,76	36089,77	35516,03	36373,88	38968,328	41269,861
30,4	56300,94	51683,44	36096,02	35522,18	36380,18	38985,305	41294,057

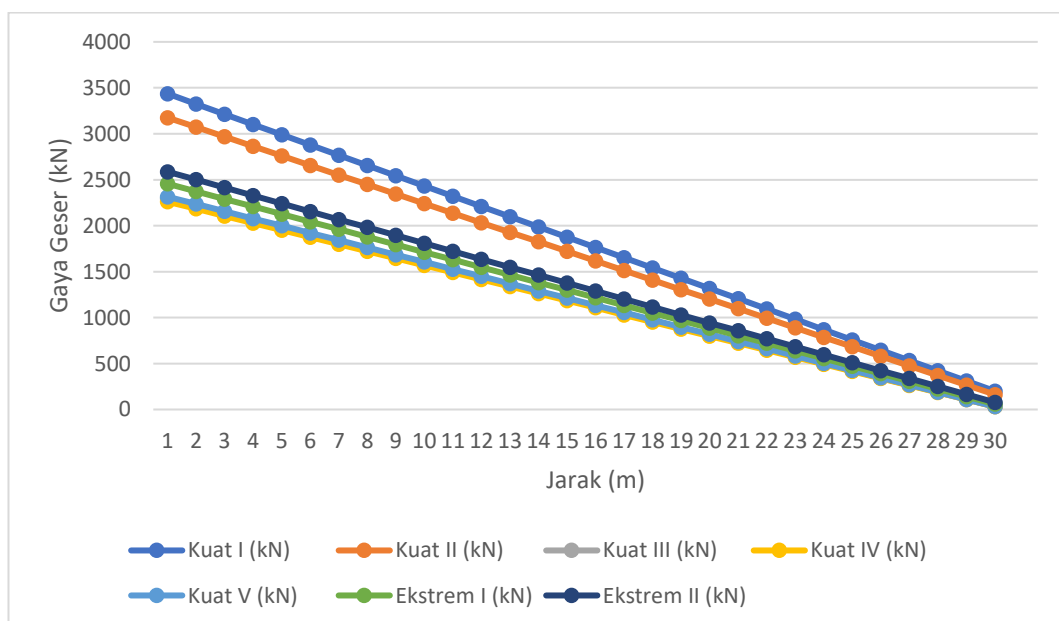
Tabel 5. 10 Kombinasi Pembebanan untuk Gaya Geser Akibat Beban pada Gelagar

Jarak x (m)	Kombinasi Pembebanan						
	Kuat I (kNm)	Kuat II (kNm)	Kuat III (kNm)	Kuat IV (kNm)	Kuat V (kNm)	Ekstrem I (kNm)	Ekstrem II (kNm)
1	3436,931	3175,415	2296,622	2260,111	2314,701	2456,248	2587,0053
2	3325,316	3071,521	2218,505	2183,236	2235,97	2373,583	2500,4808
3	3213,702	2967,626	2140,389	2106,362	2157,239	2290,919	2413,9563
4	3102,087	2863,732	2062,273	2029,487	2078,507	2208,254	2327,4318
5	2990,473	2759,837	1984,156	1952,613	1999,776	2125,589	2240,9072
6	2878,858	2655,943	1906,04	1875,738	1921,045	2042,925	2154,3827
7	2767,244	2552,048	1827,924	1798,864	1842,313	1960,26	2067,8582
8	2655,629	2448,154	1749,807	1721,989	1763,582	1877,596	1981,3337
9	2544,015	2344,259	1671,691	1645,115	1684,851	1794,931	1894,8092
10	2432,4	2240,365	1593,574	1568,24	1606,119	1712,267	1808,2846
11	2320,786	2136,47	1515,458	1491,366	1527,388	1629,602	1721,7601
12	2209,171	2032,576	1437,342	1414,491	1448,657	1546,938	1635,2356
13	2097,557	1928,681	1359,225	1337,617	1369,925	1464,273	1548,7111
14	1985,942	1824,787	1281,109	1260,742	1291,194	1381,609	1462,1866
15	1874,328	1720,892	1202,992	1183,868	1212,463	1298,944	1375,662
16	1762,713	1616,997	1124,876	1106,993	1133,731	1216,28	1289,1375
17	1651,099	1513,103	1046,76	1030,119	1055	1133,615	1202,613
18	1539,484	1409,208	968,6432	953,244	976,2686	1050,951	1116,0885
19	1427,869	1305,314	890,5268	876,3695	897,5373	968,2862	1029,564
20	1316,255	1201,419	812,4105	799,495	818,8059	885,6217	943,03944
21	1204,64	1097,525	734,2941	722,6205	740,0746	802,9571	856,51492
22	1093,026	993,6304	656,1777	645,746	661,3433	720,2926	769,9904
23	981,4114	889,7359	578,0613	568,8714	582,6119	637,6281	683,46588
24	869,7969	785,8413	499,9449	491,9969	503,8806	554,9636	596,94136
25	758,1824	681,9468	421,8285	415,1224	425,1492	472,2991	510,41684
26	646,5678	578,0523	343,7121	338,2479	346,4179	389,6345	423,89232
27	534,9533	474,1578	265,5957	261,3734	267,6866	306,97	337,3678
28	423,3388	370,2633	187,4793	184,4988	188,9552	224,3055	250,84328
29	311,7243	266,3687	109,3629	107,6243	110,2239	141,641	164,31876
30	200,1098	162,4742	31,24656	30,74981	31,49254	58,97647	77,794241
30,4	155,464	120,9164	0	0	0	25,91066	43,184433

Dari tabel 5.11 dan tabel 5.12 diatas maka dapat digambarkan diagram momen dan gaya geser akibat beban seperti pada gambar 5.14 dan 5.14 dibawah ini.



Gambar 5. 11 Diagram Momen Akibat Beban pada gelagar



Gambar 5. 12 Diagram Gaya Geser Akibat Beban pada Gelagar

5.2.3 Kebutuhan Tendon

1. Kondisi Awal (saat transfer)

Kuat tekan beton gelagar (umur 28 hari) (f'_{cg}) = 80 MPa

Kuat tekan beton gelagar (saat transfer) (f'_{cig})

Menurut RSNI T-12-2004 pasal 4.4.1.2.2 komponen beton prategang pada saat transfer gaya prategang, tegangan tekan dalam penampang beton tidak boleh melampaui nilai $0,6 \cdot f'_{cg}$. namun karena belum ada persyaratan kuat tekan beton minimal yang dinyatakan secara tertulis maka pada perhitungan biasanya digunakan $0,8 \cdot f'_{cg}$.

$$f'_{cig} = 0,8 \cdot f'_{cg}$$

$$f'_{cig} = 0,8 \cdot 80$$

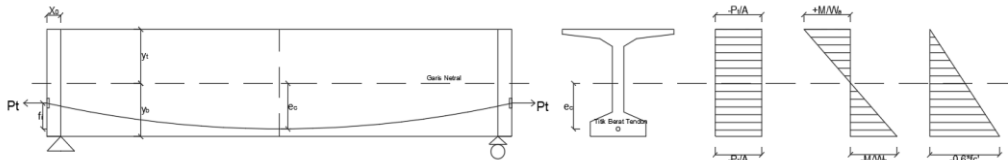
$$f'_{cig} = 64 \text{ MPa}$$

Data modulus penampang gelagar *PC Bulb-tee girder* berdasarkan pada subbab 5.2.1 didapat nilai seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 11 Data Modulus Penampang *PC Bulb-tee Girder*

Data	Notasi	Nilai	Satuan
Luas penampang gelagar	A_g	1,31182	m^2
Momen inersia gelagar	I_g	0,9172	m^4
Tinggi gelagar	h_g	2,2	m
Jarak titik berat ke serat bawah gelagar	y_b	1,0904	m
Jarak titik berat ke serat atas gelagar	y_t	1,1096	m
Modulus penampang serat bawah	S_b	0,84006	m^3
Modulus penampang serat atas	S_t	0,8268	m^3

Jarak pusat penampang prategang ke tepi bawah penampang gelagar (y_{bs}). Lokasi pusat gaya prategang berdasarkan panduan bidang jalan dan jembatan no. 02/M/BM/2021 diasumsikan 5-15 persen dari tinggi gelagar yang diukur dari sisi bawah gelagar. Pada perancangan ini digunakan nilai 7%.



Gambar 5. 13 Lokasi Pusat Prategang dan Eksentrisitas serta Diagram Tegangan pada Tengah Bentang

$$y_{bs} = 7\% \cdot h_g$$

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g) = 2,2 m

$$y_{bs} = 7\% \cdot h_g$$

$$y_{bs} = 7\% \cdot 2,2$$

$$y_{bs} = 0,154 \text{ m}$$

Eksentrisitas tendon (e_c)

$$e_c = y_b - y_{bs}$$

Dimana,

Jarak titik berat ke tepi bawah gelagar (y_b) = 1,090 m

Sehingga,

$$e_c = y_b - y_{bs}$$

$$e_c = 1,090 - 0,154$$

$$e_c = 0,936 \text{ m}$$

Gaya prategang (P_t)

Berdasarkan gambar 5.18, pada saat transfer setelah dilakukan penarikan, baja prategang akan berusaha Kembali ke bentuk awal sehingga akan menekan beton.

Karena adanya gaya tekan pada balok maka akan timbul tegangan sebesar $\frac{P}{A}$. Gaya

tekan tersebut akan membuat balok melengkung ke atas, sehingga serat atas balok akan mengalami Tarik (momen positif) dan serat bawah akan mengalami tekan (momen negatif). Besarnya gaya prategang yang dipakai adalah nilai terkecil dari gaya prategang pada serat atas dan gaya prategang pada serat bawah.

1) Gaya prategang awal pada serat atas (P_{t1})

Berdasarkan gambar 5.16 persamaan tegangan pada serat atas yaitu

$$0 = -\frac{P_t}{A_g} + \frac{M}{S_t}$$

Dari persamaan tersebut didapatkan rumus untuk menentukan gaya prategang awal dengan persamaan berikut.

$$P_{t1} = \frac{M_{MS-G}}{e_c - \frac{S_t}{A_g}}$$

Dimana,

Berat gelagar (M_{MS-G}) = 17666,057 kNm

Luas pemampang gelagar (A_g) = 1,312 m²

Modulus penampang serat atas (S_t) = 0,841 m³

Sehingga,

$$P_{t1} = \frac{M_{MS-G}}{e_c - \frac{S_t}{A_g}}$$

$$P_{t1} = \frac{17666,057}{0,936 - \frac{0,841}{1,312}}$$

$$P_{t1} = 59851,332 \text{ kN}$$

2) Gaya prategang awal pada serat bawah (P_{t2})

Berdasarkan persamaan 5.16 persamaan tegangan pada serat atas adalah sebagai berikut.

$$-0,6 \cdot f'_{cg} = -\frac{P_t}{A_g} - \frac{M}{S_b}$$

Dari persamaan diatas didapatkan persamaan untuk menentukan nilai gaya prategang awal pada serat atas dengan persamaan berikut.

$$P_{t2} = \frac{0,6 \cdot f'_{cg} \cdot S_b + M_{MS-G}}{\frac{S_b}{A_g} + e_c}$$

Dimana,

Kuat tekan beton gelagar saat transfer (f'_{cg}) = 64 mPa

Modulus penampang serat bawah (S_b) = 0,827 m³

$$P_{t2} = \frac{0,6 \cdot f'_{cg} \cdot S_b + M_{MS-G}}{\frac{S_b}{A_g} + e_c}$$

$$P_{t2} = \frac{0,6 \cdot 64 \cdot 0,827 + 17666,057}{\frac{0,827}{1,312} + 0,936}$$

$$P_{t2} = 11297,743 \text{ kN}$$

Gaya prategang awal yang digunakan (P_t)

Berdasarkan perhitungan diatas, nilai gaya prategang awal yang digunakan adalah 11297,743 kN.

2. Kondisi akhir

Tipe *strand* yang digunakan adalah *uncoated 7 wire super strand* ASTM A-416 *grade 270* yang di produksi oleh VSL. Berikut adalah spesifikasi baja prategang berdasarkan katalog VSL. Spesifikasi baja prategang dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 12 spesifikasi Baja Prategang Berdasarkan VSL

Data	Notasi	Nilai	Satuan
Tegangan leleh <i>strand</i>	f_{py}	1674000	kPa
Kuat Tarik <i>strand</i>	f_{pu}	1860000	kPa
Diameter nominal satu <i>strand</i>		0,0152	M
Luas tampang nominal satu <i>strand</i>	A_{strand}	0,00014	m ²
Beban putus minimal satu <i>strand</i>	P_{bs}	183,7	kN
Jumlah <i>strand</i> dalam satu tendon		19	
Luas penampang <i>strand</i>		0,084	M
Beban putus tendon	P_{b1}	3490,3	kN
Modulus elastis <i>strand</i>	E_{ps}	197000000	kPa

Jumlah tendon yang diperlukan (n_t)

$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,8 \cdot P_{bs}}$$

Dimana,

Gaya prategang awal yang digunakan (P_t) = 11297,743 kN

Beban putus satu tendon (P_{b1}) = 3490,3 kN

Sehingga,

$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,8 \cdot P_{bs}}$$

$$n_t = \frac{11297,743}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 3490,3}$$

$$n_t = 4,760 \text{ tendon}$$

Jadi jumlah tendon pakai (n_t) = 5 tendon

Jumlah strand yang dibutuhkan (n_s)

$$n_s = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,8 \cdot P_{bs}}$$

Dimana,

gaya prategang awal yang digunakan (P_t) = 11297,743 kN

beban putus minimal satu *strand* (P_{bs}) = 183,7

sehingga,

$$n_s = \frac{11297,743}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 183,7}$$

$$n_s = \frac{11297,743}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 183,7}$$

$$n_s = 90,443 \text{ strand}$$

Jadi jumlah *strand* yang digunakan adalah hasil dari jumlah tendon di kalikan dengan jumlah *strand* dalam satu tendon

$$n_s = 5 \cdot 19 = 95 \text{ strand}$$

Luas strand total yang digunakan (A_{ps})

$$A_{ps} = A_{strand} \cdot n_s$$

$$A_{ps} = 140 \cdot 95$$

$$A_{ps} = 13300 \text{ mm}^2$$

Presentase prategang yang terjadi akibat *jacking*

$$p_o = \frac{P_t}{0,85 \cdot n_s \cdot p_{bs}}$$

$$p_o = \frac{11297,743}{0,85 \cdot 95 \cdot 183,7}$$

$$p_o = 76,162\%$$

Gaya prategang yang terjadi akibat *jacking* (P_j)

$$P_j = p_o \cdot n_s \cdot P_{bs}$$

$$P_j = 76,162 \cdot 95 \cdot 183,7$$

$$P_j = 13291,462 \text{ kN}$$

Kehilangan tegangan (*loss of prestress*)

Nilai kehilangan tegangan diasumsikan sebesar 23%

Gaya prategang akhir setelah kehilangan tegangan (P_{eff})

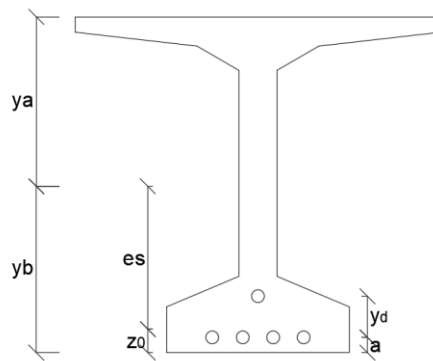
$$P_{eff} = (1 - \text{loss of prestress}) \cdot P_j$$

$$P_{eff} = (1 - 23\%) \cdot 13291,462$$

$$P_{eff} = 10234,426 \text{ kN}$$

3. Posisi tendon di tengah bentang

Posisi tendon di tengah bentang dapat dilihat pada gambar 5.14 Dibawah ini



Gambar 5. 14 posisi tendon di tengah bentang

Jarak dari alas gelagar ke as tendon terbawah (a)=0,1 m

Jumlah tendon baris ke-1 (n_1)

$$n_1 = 4 \text{ tendon}$$

$$n_1 = 19 \text{ strand}$$

$$n_1 = 76 \text{ strand}$$

Jumlah tendon baris ke-2 (n_2)

$$n_2 = 1 \text{ tendon}$$

$$n_2 = 1 \cdot 19 \text{ strand}$$

$$n_2 = 19 \text{ strand}$$

Jarak vertikal antara as ke as tendon (y_d)

Momen statis tendon terhadap alas menghasilkan persamaan sebagai berikut.

$$n_s \cdot y_{bs} = n_1 \cdot a + n_2 \cdot (a + y_d)$$

Dari persamaan tersebut dapat ditentukan jarak vertikal antara as ke as tendon dengan persamaan berikut.

$$y_d = \frac{n_s \cdot (y_{bs} - a)}{n_2}$$

Dimana,

Jumlah strand yang digunakan (n_s)=95

Jarak pusat penampang prategang ke bawah penampang gelagar (y_{bs})= 0,154 m

Sehingga,

$$y_d = \frac{n_s \cdot (y_{bs} - a)}{n_2}$$

$$y_d = \frac{95 \cdot (0,154 - 0,1)}{19}$$

$$y_d = 0,27 \text{ m}$$

Jarak titik berat tendon terhadap alas gelagar (y_{mid})

$$y_{mid} = y_{bs}$$

$$y_{mid} = 0,154 \text{ m}$$

Jarak bersih vertikal antara selubung tendon

Jarak bersih vertikal antara selubung tendon harus lebih dari 25 mm. nilai tersebut didapatkan dengan mengurangi jarak vertikal as ke as tendon dengan diameter selubung tendon. Dimana sesuai tabel 5.12 diameter selubung tendon (d_t) yaitu 0,084 m.

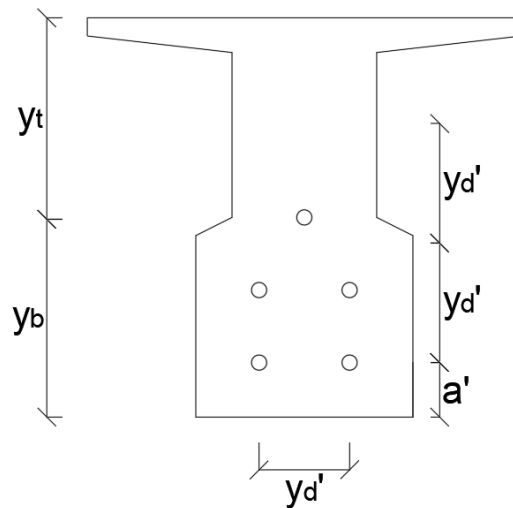
$$y_d - d_t = 0,270 - 0,084$$

$$y_d - d_t = 0,186 \text{ m}$$

Jadi nilai jarak bersih vertikal antara selubung tendon memenuhi karena melebihi 25 mm.

4. Posisi tendon di tumpuan

Posisi tendon di tumpuan dapat dilihat pada gambar 5.15 dibawah ini.



Gambar 5. 15 Posisi Tendon di Tumpuan

Jarak dari alas gelagar ke as tendon tebawah (a')=0,3 m

Jumlah tendon baris ke-1 (n_1)

$n_1 = 2$ tendon, terdiri dari 38 strand

Jumlah tendon baris ke-2 (n_2)

$n_2 = 2$ tendon, terdiri dari 38 strand

Jumlah tendon baris ke-3 (n_3)

$n_3 = 1$ tendon, terdiri dari 19 strand

Momen statis tendon terhadap pusat tendon bawah

n_i	y_d'	$n_i \cdot y_d'$
38	0	0
38	1	38
19	2	38
$\frac{\sum n_i \cdot y_d'}{y_d'}$		76

Letak titik berat tendon terhadap pusat tendon terbawah (y_e)

$$y_e = z_0 - a'$$

Dimana,

Jarak titik berat ke bawah gelagar (y_b)=1,090

Sehingga,

$$y_e = z_0 - a'$$

$$y_e = 0,62 - 0,3$$

$$y_e = 0,32 \text{ m}$$

Jarak vertikal antara as ke as tendon (y_d')

$$y_d' = \frac{y_e \cdot n_s}{\sum n_i \cdot y_d'}$$

Dimana,

Jumlah strand yang digunakan (n_s)=95

Sehingga,

$$y_d' = \frac{y_e \cdot n_s}{\sum n_i \cdot y_d'}$$

$$y_d' = \frac{0,32 \cdot 95}{76}$$

$$y_d' = 0,4 \text{ m}$$

Jarak titik berat tendon terhadap alas gelagar (y_{end})

$$y_{end} = a' + y_e$$

$$y_{end} = 0,3 + 0,32$$

$$y_{end} = 0,62 \text{ m}$$

5. Eksentrisitas masing-masing tendon

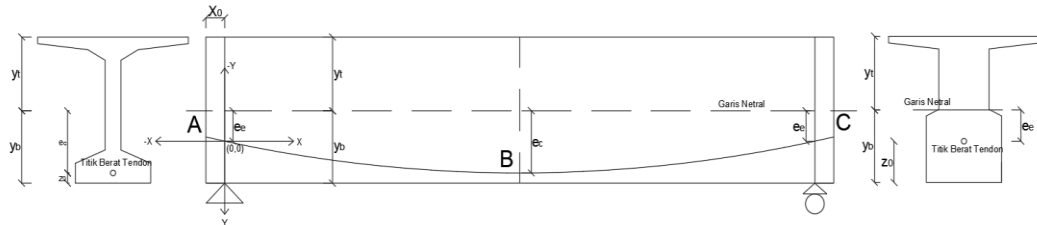
Berikut adalah perhitunga eksentrisitas masing-masing tendon yang dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 13 Eksentrisitas masing-masing Tendon

Tumpuan			Tengah bentang			eksentrisitas
Nomor Tendon	Posisi Tendon	z_i' (m)	Nomor Tendon	Posisi Tendon	z_i (m)	$f_i = z_i' - z_i$ (m)
1	$z_1' = a' + 2 \cdot y_d'$	1,100	1	$z_1 = a + y_d$	0,37	0,730
2	$z_2' = a' + y_d'$	0,700	2	$z_2 = a$	0,1	0,600
3	$z_3' = a' + y_d'$	0,700	3	$z_3 = a$	0,1	0,600
4	$z_4' = a'$	0,300	4	$z_4 = a$	0,1	0,200
5	$z_5' = a'$	0,300	5	$z_5 = a$	0,1	0,200
0	$z_1' = a' + y_e$	0,620	0	$z_0 = y_{bs}$	0,154	0,466

6. Lintasan Inti Tendon

Berikut adalah ilustrasi lintasan tendon yang dapat dilihat pada gambar 5.16 dibawah ini.



Gambar 5. 16 Lintasan Tendon

Perhitungan lintasan tendon dapat dilakukan dengan persamaan berikut.

$$Y = 4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot (L - X)$$

Dimana,

Panjang bentang (L)= 60 m

Eksentrisitas tendon (f)

Pada perhitungan di sub bab 5.2.3 didapatkan nilai eksentrisitas tendon (e_c) yaitu 0,936 m

$$f = e_c$$

$$f = 0,936 \text{ m}$$

Sehingga hasil perhitungan lintasan tendon dapat dilihat pada tabel 5.16 dibawah ini.

Tabel 5. 14 Hasil Perhitungan Lintasan Tendon

X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
-0,4	-0,025	16	0,732	33	0,927	50	0,520
0	0,000	17	0,761	34	0,920	51	0,478
1	0,061	18	0,787	35	0,910	52	0,433
2	0,121	19	0,811	36	0,899	53	0,386
3	0,178	20	0,832	37	0,885	54	0,337
4	0,233	21	0,852	38	0,870	55	0,286
5	0,286	22	0,870	39	0,852	56	0,233
6	0,337	23	0,885	40	0,832	57	0,178
7	0,386	24	0,890	41	0,811	58	0,121
8	0,433	25	0,910	42	0,787	59	0,061
9	0,478	26	0,920	43	0,761	60	0,000
10	0,520	27	0,927	44	0,732	0,4	0,025
11	0,561	28	0,932	45	0,702	60	0,000
12	0,599	29	0,935	46	0,670	0,4	-0,025
13	0,636	30	0,936	47	0,636		
14	0,670	31	0,935	48	0,599		
15	0,702	32	0,932	49	0,561		

Berdasarkan gambar 5.19 dan tabel 5.16 maka didapatkan nilai-nilai berikut.

Letak tendon (x_0)

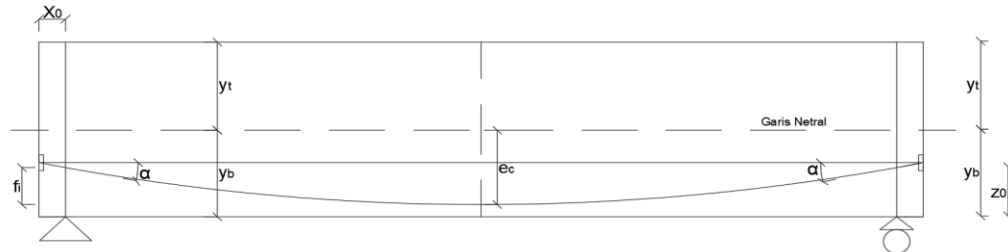
$$x_0 = 0,4 \text{ m}$$

Jarak vertikal dari tendon di permukaan ke tendon di tumpuan (e_0)

$$e_0 = 0,025 \text{ m}$$

7. Sudut Angkur

Sudut Angkur yaitu Perpotongan Antara Garis Tegak Lurus Tinggi Gelagar dan Garis Arah Lintasan Tendon (α)



Gambar 5. 17 Sudut Angkur

Perhitungan sudut angkur dilakukan dengan menurunkan persamaan lintasan tendon.

$$Y = 4 \cdot f \cdot \frac{X}{L^2} \cdot (L - X)$$

$$\frac{dY}{dX} = \frac{4 \cdot f \cdot (L - 2 \cdot X)}{L^2}$$

Karena letak angkur di tumpuan adalah $X=0$ maka $\frac{dY}{dX} = \frac{4 \cdot f}{L}$ sehingga persamaan sudut angkur menjadi sebagai berikut.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{dY}{dX}\right)$$

Dari persamaan diatas maka dihasilkan nilai seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 15 Sudut Angkur

Nomor Tendon	f_i	$\frac{dY}{dX}$	a_i (derajat)
1	0,730	0,049	2,786
2	0,600	0,040	2,291
3	0,600	0,040	2,291
4	0,200	0,013	0,764
5	0,200	0,013	0,764
0	0,466	0,031	1,779

8. Tata Letak dan Trace Tendon

Posisi masing-masing tendon dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

Diketahui pada tabel 5.15 didapat nilai sebagai berikut.

Jarak titik berat tendon terhadap alas gelagar di tumpuan (z_0)

$$z_0 = 0,620$$

Posisi tendon 1 di tumpuan (z_1')= 1,100 m

Posisi tendon 2 di tumpuan (z_2')= 0,700 m

Posisi tendon 3 di tumpuan (z_3')= 0,700 m

Posisi tendon 4 di tumpuan (z_4')= 0,300 m

Posisi tendon 5 di tumpuan (z_5')= 0,300 m

Posisi garis netral tendon di tumpuan (z_0) = 0,620 m

Eksentrisitas tendon 1 (f_1)= 0,730 m

Eksentrisitas tendon 2 (f_2)= 0,600 m

Eksentrisitas tendon 3 (f_3)= 0,600 m

Eksentrisitas tendon 4 (f_4)= 0,200 m

Eksentrisitas tendon 5 (f_5)= 0,200 m

Eksentrisitas garis netral tendon= 0,466 m

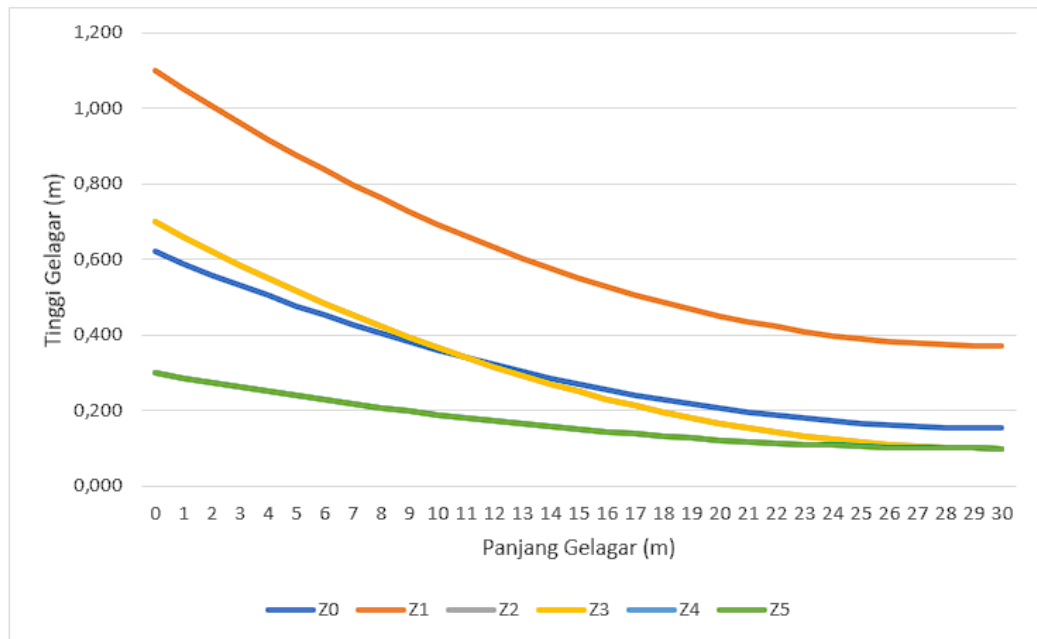
Panjang bentang (L)= 60 m

Untuk mencari tata letak tendon di sepanjang gelagar lakukan perhitungan menggunakan persamaan di atas. Sehingga di dapatkan nilai tata letak tendon seperti pada tabel 5.18 di bawah ini.

Tabel 5. 16 Tata Letak Tendon

Jarak	Trace	Posisi masing-masing Tendon				
		Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0	0,620	1,100	0,700	0,700	0,300	0,300
1	0,589	1,052	0,661	0,661	0,287	0,287
2	0,560	1,006	0,623	0,623	0,274	0,274
3	0,531	0,961	0,586	0,586	0,262	0,262
4	0,504	0,918	0,551	0,551	0,250	0,250
5	0,478	0,877	0,517	0,517	0,239	0,239
6	0,452	0,837	0,484	0,484	0,228	0,228
7	0,428	0,799	0,453	0,453	0,218	0,218
8	0,405	0,763	0,423	0,423	0,208	0,208
9	0,382	0,728	0,394	0,394	0,198	0,198
10	0,361	0,694	0,367	0,367	0,189	0,189
11	0,341	0,663	0,341	0,341	0,180	0,180
12	0,322	0,633	0,316	0,316	0,172	0,172
13	0,304	0,604	0,293	0,293	0,164	0,164
14	0,287	0,578	0,271	0,271	0,157	0,157
15	0,271	0,553	0,250	0,250	0,150	0,150
16	0,255	0,529	0,231	0,231	0,144	0,144
17	0,242	0,507	0,213	0,213	0,138	0,138
18	0,229	0,487	0,196	0,196	0,132	0,132
19	0,217	0,468	0,181	0,181	0,127	0,127
20	0,206	0,451	0,167	0,167	0,122	0,122
21	0,196	0,436	0,154	0,154	0,118	0,118
22	0,187	0,422	0,143	0,143	0,114	0,114
23	0,179	0,410	0,133	0,133	0,111	0,111
24	0,173	0,399	0,124	0,124	0,108	0,108
25	0,167	0,390	0,117	0,117	0,106	0,106
26	0,162	0,383	0,111	0,111	0,104	0,104
27	0,159	0,377	0,106	0,106	0,102	0,102
28	0,156	0,373	0,103	0,103	0,101	0,101
29	0,155	0,371	0,101	0,101	0,100	0,100
30	0,154	0,370	0,100	0,100	0,100	0,100

Dari tabel 5.16 tata letak tendon dapat dilihat pada gambar 5.18 dibawah ini.



Gambar 5. 18 Tata Letak Tendon

Berdasarkan gambar 5.18 diatas yang menggambarkan tata letak tendon pada setengah panjang gelagar. Terdapat beberapa tendon yang digambarkan dengan garis yang memiliki simbol Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 sebagai tendon utama, dan Z0 sebagai garis netral dari tendon. Adapun posisi tendon 2 dan 3 yang digambarkan dengan Z2 dan Z3 hanya tergambar oleh satu garis yaitu garis kuning (Z3) karena posisi kedua tendon sejajar jika dilihat dari tampak samping, begitupun tendon 4 dan 5 yang digambarkan dengan Z4 dan Z5 hanya tergambar dengan tendon warna hijau (Z5).

5.2.4 Kehilangan Prategang

5.2.4.1 Kehilangan Prategang Akibat Gesekan

Kehilangan prategang akibat gesekan dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_x = P_j \cdot e^{-(Kx + \mu a)}$$

$$a = \frac{2e_p}{L_p}$$

$$\Delta_{fp} = \frac{P_j - P_x}{A_{strand}}$$

Dimana f_{pj} adalah prategang saat *jacking*, K adalah koefisien gesek *wobble* dan μ adalah koefisien kelengkungan, x adalah panjang tendon yang diukur dari ujung *jacking* ke titik yang ditinjau, a adalah penjumlahan dari nilai absolut perubahan sudut pada jalur baja prategang dari *jacking* hingga ujung *jacking*.

Berikut adalah perhitungan kehilangan gaya prategang akibat gesekan.

Gaya prategang awal (P_j)

$$P_j = P_t$$

Dimana,

Gaya prategang (P_t) = 11297,743 kN

Koefisien *wobble* (K)

Berdasarkan SNI-03-2847-2002 tabel 14 koefisien *wobble* untuk *strand* 7 kawat ditentukan sebesar 0,0016.

Koefisien gesek kelengkungan (μ)

Berdasarkan SNI-03-2847-2002 tabel 14 koefisien gesek kelengkungan untuk *strand* 7 kawat ditentukan sebesar 0,15

Jarak vertikal tendon di tumpuan dengan tendon di tengah bentang (e_p)

$$e_p = y_{end} - y_{mid}$$

Dimana,

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{mid}) = 0,154 m

Jarak titik berat tendon terhadap pusat tendon terbawah (y_{end}) = 0,620 m

Sehingga,

$$e_p = y_{end} - y_{mid}$$

$$e_p = 0,620 - 0,154$$

$$e_p = 0,466 \text{ m}$$

Tegangan baja prategang sebelum transfer (f_{pbt})

$$f_{pbt} = 0,75 \cdot f_{pu}$$

Dimana,

Tegangan putus baja prategang (f_{pu}) = 1860 MPa

Sehingga,

$$f_{pbt} = 0,75 \cdot 1860$$

$$f_{pbt} = 0,75 \cdot 1860$$

$$f_{pbt} = 1395 \text{ MPa}$$

Gaya prategang saat *jacking* (f_{pj})

$$f_{pj} = f_{pbt}$$

$$f_{pj} = 1395 \text{ MPa}$$

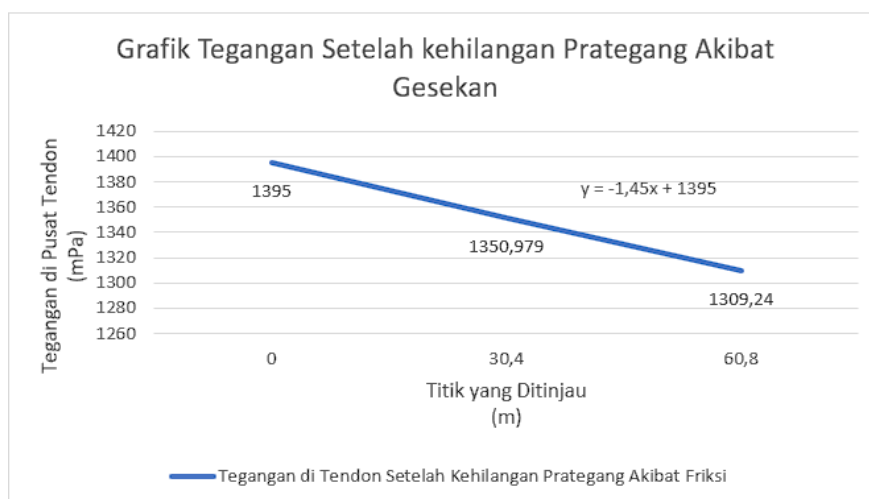
Luas strand total (A_{strand}) = 13300 mm²

Sehingga perhitungan kehilangan prategang akibat gesekan menghasilkan nilai seperti pada tabel 5.17 dibawah ini.

Tabel 5. 17 Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan

Segmen	e_p	L_p	a	$\sum a$	$\sum L_p$	Titik	P_x	Δ_{fpF}	$f_{pj} - \Delta_{fpF}$
	(mm)	(m)	(rad)	(rad)	(m)		(kN)	(Mpa)	(Mpa)
A	0,466	0	0	0	0	A	11297,743	0	1395,00
AB	0,466	30,4	0,031	0,031	30,4	B	10711,996	44,04108	1350,959
BC	0,466	30,4	0,031	0,061	60,8	C	10156,619	85,7988	1309,201

Dari tabel 5.17 diatas maka dihasilkan grafik kehilangan prategang akibat gesekan seperti pada gambar 5.19 dibawah ini.



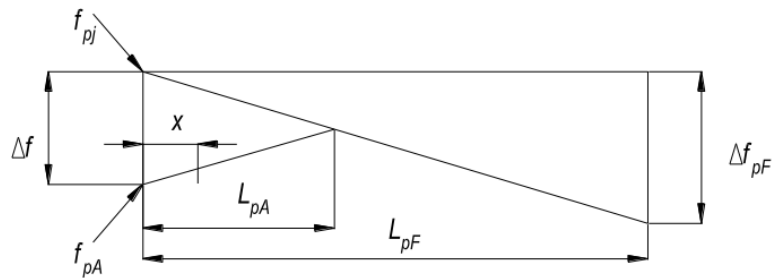
Gambar 5. 19 Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan

Jadi kehilangan prategang rata-rata akibat gesekan ($f_{pj} - \Delta_{fpF}$) di tengah bentang adalah 1350,979 MPa dan kehilangan prategang akibat gesekan Δ_{fpF} yang terjadi di tengah bentang adalah 44,041 MPa.

5.2.4.1 Kehilangan Prategang Akibat *Anchorage Set* (Pergeseran Angkur) (Δ_{fpA})

Δ_{fpA})

Kehilangan prategang akibat pergeseran ankur dan gesekan diilustrasikan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 5. 20 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pergeseran Angkur dan Gesekan

Berdasarkan gambar diatas semakin jauh jarak dari ankur hidup (ujung kiri) maka kehilangan prategang akibat gesekan akan semakin kecil. Pada ujung kiri akan terjadi perubahan tegangan akibat kehilangan prategang akibat pergeseran ankur (Δf). Semakin jauh jarak dari ankur hidup maka kehilangan prategang akibat pergeseran ankur akan semakin besar hingga memotong grafik kehilangan prategang akibat gesekan dengan titik potong pada saat kehilangan prategang akibat pergeseran ankur (Δ_{fpA}) bernilai 0. Berikut adalah perhitungan kehilangan prategang akibat pergeseran ankur. Panjang gelagar yang dipengaruhi kehilangan prategang akibat pergeseran ankur (L_{pA})

$$L_{pA} = \sqrt{\frac{E_s \cdot \Delta L \cdot L_{pF}}{\Delta_{fpF}}}$$

Dimana,

Modulus elastisitas ankur (E_s) = 200000 MPa

Panjang kehilangan prategang akibat gesekan (L_{pF}) = 60800 mm

Kehilangan prategang rata-rata akibat gesekan (Δ_{fpF})

Berdasarkan tabel 5.17 diatas didapat nilai kehilangan prategang akibat gesekan pada jarak 60,8 m dari angkur hidup sebesar 85,799 MPa.

Panjang slip tendon yang terjadi (ΔL)

Berdasarkan AAHSTO LRFD Nilai panjang slip tendon yang terjadi diasumsikan sebesar 9,525 mm.

Sehingga,

$$L_{pA} = \sqrt{\frac{E_s \cdot \Delta L \cdot L_{pF}}{\Delta_{fpF}}}$$

$$L_{pA} = \sqrt{\frac{200000 \cdot 9,525 \cdot 60800}{85,799}}$$

$$L_{pA} = 36741,651 \text{ mm}$$

Perubahan rata-rata tegangan akibat kehilangan prategang karena pergeseran angkur pada tendon (Δ_f)

$$\Delta_f = \frac{2 \cdot \Delta_{fpF} \cdot L_{pA}}{L_{pF}}$$

$$\Delta_f = \frac{2 \cdot 85,760 \cdot 36741,651}{60800}$$

$$\Delta_f = 103,697 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang akibat pergeseran angkur (Δ_{fpA})

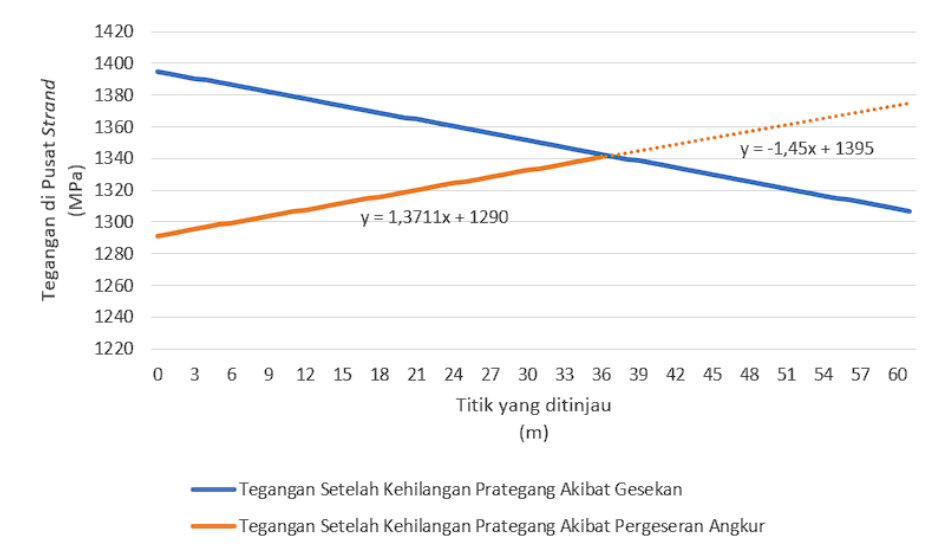
$$\Delta_{fpA} = \Delta_f \cdot \left(1 - \frac{x}{L_{pA}}\right)$$

Berdasarkan persamaan diatas maka didapat nilai tegangan setelah kehilangan prategang akibat pergeseran angkur dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. 18 Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur

Lokasi		Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur	Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan	Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur
		Δ_{fpA}	$f_{pj} - \Delta_{fpF}$	$(f_{pj} - \Delta_{fpF}) - \Delta_{fpA}$
$\frac{X}{L}$	X (mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0	0	103,697	1395,000	1291,303
0,1	6080	86,537	1379,976	1293,438
0,2	12160	69,378	1364,951	1295,574
0,3	18240	52,218	1349,927	1297,709
0,4	24320	35,058	1334,903	1299,845
0,5	30400	17,898	1319,879	1301,980
0,6	36480	0,738	1304,854	1304,116
0,6043	36741,6514	0	1304,208	1304,208
0,7	42560		1289,830	
0,8	48640		1274,806	
0,9	54720		1259,781	
1	60800		1244,757	

Dari tabel 5.18 diatas maka dapat digambarkan grafik seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 21 Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan dan Pergeseran Angkur

Dari gambar 5.21 dapat dilihat bahwa grafik kehilangan prategang akibat pergeseran ankur memotong grafik kehilangan prategang akibat gesekan pada titik sejauh 36,741 m. sehingga kehilangan prategang akibat pergeseran ankur di tengah bentang adalah 17,898 MPa.

5.2.4.1 Kehilangan Prategang Akibat Perpendekan Elastis (Δ_{fpEs})

$$\text{Jumlah tendon } (N_{ps}) = 5 \text{ buah}$$

$$\text{Momen akibat berat sendiri gelagar } (M_{MS_G}) = 17666,058 \text{ kNm}$$

$$\text{Tegangan pada tendon saat transfer } (f_{pi1}) = 1333,061 \text{ Mpa}$$

Dimana,

$$f_{pi1} = f_{pbt} - (\Delta_{fpF} + \Delta_{fpA})$$

$$\text{Tegangan baja prategang sebelum transfer } (f_{pbt}) = 1395 \text{ kNm}$$

$$\text{Kehilangan gaya prategang akibat gesekan } (\Delta_{fpF}) = 44,041 \text{ MPa}$$

$$\text{Kehilangan akibat pergeseran angkur } (\Delta_{fpA}) = 17,898 \text{ MPa}$$

Sehingga,

$$f_{pi1} = f_{pbt} - (\Delta_{fpF} + \Delta_{fpA})$$

$$f_{pi1} = 1395 - (44,041 + 17,898)$$

$$f_{pi1} = 1333,061 \text{ MPa}$$

Gaya prategang awal (P_i)

$$P_i = f_{pi1} \cdot A_{ps}$$

Dimana,

$$\text{Luas total tendon } (A_{ps}) = 13300 \text{ mm}^2$$

Sehingga,

$$P_i = f_{pi1} \cdot A_{ps}$$

$$P_i = 1333,061 \cdot 13300$$

$$P_i = 17729707,169 \text{ N}$$

Tegangan di beton pada level baja (f_{cgp})

$$f_{cgp} = \frac{P_i}{A_g} + \frac{P_i \cdot e_{mid}^2}{I_g} - \frac{M_{MS-G} \cdot e_{mid}}{I_g}$$

Dimana,

Eksentrisitas rata-rata tendon di tengah bentang (e_{mid}) = 936 mm

Luas penampang gelagar (A_g) = 1311822,25 mm²

Momen inersia gelagar (I_g) = 0,917 m⁴

Momen akibat berat sendiri gelagar (M_{MS-G}) = 17666,058 kNm

Sehingga,

$$f_{cgp} = \frac{P_i}{A_g} + \frac{P_i \cdot e_{mid}^2}{I_g} - \frac{M_{MS-G} \cdot e_{mid}}{I_g}$$

$$f_{cgp} = \frac{17729707,169}{1311822,25} + \frac{17729707,169 \cdot 936^2}{917194560000} - \frac{17666,058 \cdot 936}{917194560000}$$

$$f_{cgp} = 30465 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{cgp} = 30,465 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis (Δ_{fpES})

$$\Delta_{fpES} = \frac{N_{ps} - 1}{2 \cdot N_{ps}} \cdot \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgp}$$

Dimana,

Jumlah tendon (N_{ps}) = 5 buah

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 197000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{cig}) = 37600 MPa

Sehingga,

$$\Delta_{fpES} = \frac{N_{ps} - 1}{2 \cdot N_{ps}} \cdot \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgp}$$

$$\Delta_{fpES} = \frac{5 - 1}{2 \cdot 5} \cdot \frac{197000}{37600} \cdot 30,465$$

$$\Delta_{fpES} = 63,847 \text{ MPa}$$

5.2.4.2 Kehilangan Prategang Jangka Panjang

Kehilangan prategang jangka panjang terdiri dari 2 fase, yaitu kehilangan prategang saat transfer dan kehilangan prategang saat final. Untuk perhitungan kehilangan prategang jangka panjang diperlukan data properti penampang transformasi yang meliputi data :

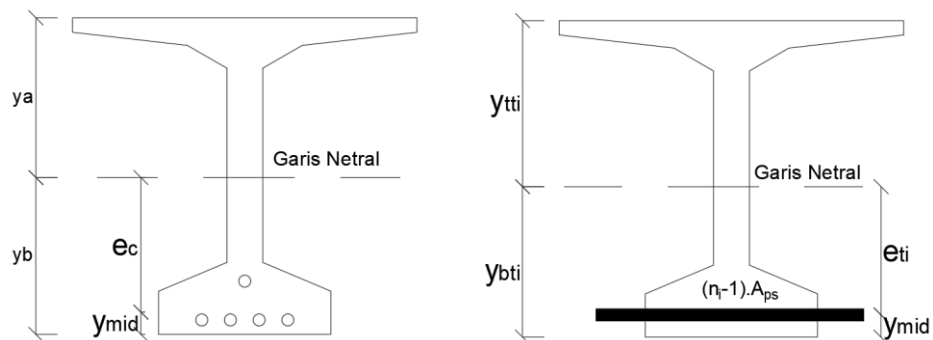
- properti penampang transformasi saat transfer
- properti penampang transformasi saat final

Berikut ini adalah perhitungan kehilangan prategang jangka panjang pada *PC Bulb-tee girder*.

1. Karakteristik penampang transformasi

a. Properti penampang nonkomposit transformasi saat transfer

Property penampang nonkomposit saat transfer ditentukan dengan cara mentransformasikan luas penampang tendon dengan mengalikan luas tendon dengan faktor $(n_i - 1)$. Dimana n_i adalah rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{ci}) . Penampang gelagar nonkomposit transformasi saat transfer ditunjukkan oleh gambar 5.22 dibawah ini.



Gambar 5. 22 Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Transfer

Rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas beton gelagar saat transfer (n_i)

$$n_i = \frac{E_{ps}}{E_{cig}}$$

Dimana,

$$\text{Modulus elastisitas baja prategang (} E_{ps} \text{)} = 197000 \text{ Mpa}$$

$$\text{Modulus elastisitas gelagar saat transfer (} E_{cig} \text{)} = 37600 \text{ Mpa}$$

Sehingga,

$$n_i = \frac{E_{ps}}{E_{cig}}$$

$$n_i = \frac{197000}{37600}$$

$$n_i = 5,24$$

Luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat transfer (A_{gti})

$$A_{gti} = A_g + (n_i - 1) \cdot A_{ps}$$

Dimana,

$$\text{Luas penampang gelagar nonkomposit (} A_g \text{)} = 1,312 \text{ m}^2$$

$$\text{Luas total } strand \text{ (} A_{ps} \text{)} = 0,013 \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$A_{gti} = A_g + (n_i - 1) \cdot A_{ps}$$

$$A_{gti} = 1,312 + (5,24 - 1) \cdot 0,013$$

$$A_{gti} = 1,36712 \text{ m}^2$$

Jarak garis netral ke tepi bawah penampang gelagar nonkomposit transformasi (y_{bti})

$$y_{bti} = \frac{A_g \cdot y_b + (n_i - 1) \cdot A_{ps} \cdot y_{mid}}{A_{gti}}$$

Dimana,

$$\text{Luas penampang gelagar nonkomposit (} A_g \text{)} = 1,312 \text{ m}^2$$

$$\text{Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah (} y_b \text{)} = 1,090 \text{ m}$$

$$\text{Jarak titik berat } strand \text{ ke tepi bawah (} y_{mid} \text{)} = 0,154 \text{ m}$$

$$\text{Luas total } \textit{strand} (A_{ps}) = 0,013 \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$y_{bti} = \frac{A_g \cdot y_b + (n_i - 1) \cdot A_{ps} \cdot y_{mid}}{A_{gti}}$$

$$y_{bti} = \frac{1,312 \cdot 1,090 + (5,24 - 1) \cdot 0,013 \cdot 0,154}{1,36712}$$

$$y_{bti} = 1,0522 \text{ m}$$

Jarak garis netral ke tepi atas penampang gelagar nonkomposit transformasi

(y_{tti})

$$y_{tti} = h_g - y_{bti}$$

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g) = 2,2 m

Sehingga,

$$y_{tti} = h_g - y_{bti}$$

$$y_{tti} = 2,2 - 1,0522$$

$$y_{tti} = 1,147 \text{ m}$$

Momen inersia *strand* (I_s)

$$I_s = n_s \cdot \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot D_s^4$$

Dimana,

Diameter nominal satu *strand* (D_s) = 0,0152 m

Jumlah *strand* yang digunakan (n_s) = 95

Sehingga,

$$I_s = n_s \cdot \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot D_s^4$$

$$I_s = 95 \cdot \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot 0,0152^4$$

$$I_s = 24,892 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

Momen inersia penampang gelagar transformasi saat transfer (I_{ti})

$$I_{ii} = I_g + A_g \cdot (y_{bti} - y_b)^2 + I_s + (n_i - 1) \cdot A_{ps} \cdot (y_{bti} - y_{mid})^2$$

Dimana,

$$\text{Luas penampang gelagar nonkomposit } (A_g) = 1,312 \text{ m}^2$$

$$\text{Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah } (y_b) = 1,090 \text{ m}$$

$$\text{Jarak titik berat } \textit{strand} \text{ ke tepi bawah } (y_{mid}) = 0,154 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia strand } (I_s) = 24,892 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\text{Momen inersia gelagar } (I_g) = 0,917 \text{ m}^4$$

$$\text{Luas total strand } (A_{ps}) = 0,013 \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$I_{ii} = I_g + A_g \cdot (y_{bti} - y_b)^2 + I_s + (n_i - 1) \cdot A_{ps} \cdot (y_{bti} - y_{mid})^2$$

$$I_{ii} = 0,917 + 1,312 \cdot (1,0522 - 1,09)^2 + 24,892 \cdot 10^{-8} + (5,24 - 1) \cdot 0,013 \cdot (1,0522 - 0,154)^2$$

$$I_{ii} = 0,963 \text{ m}^4$$

Modulus penampang bawah gelagar nonkomposit transformasi (S_{bti})

$$S_{bti} = \frac{I_{ii}}{y_{bti}}$$

$$S_{bti} = \frac{0,963}{1,0522}$$

$$S_{bti} = 0,915 \text{ m}^3$$

Modulus penampang atas gelagar nonkomposit transformasi (S_{tti})

$$S_{tti} = \frac{I_{ii}}{y_{tti}}$$

$$S_{tti} = \frac{0,963}{1,147}$$

$$S_{tti} = 0,839 \text{ m}^3$$

Eksentrisitas tendon rata-rata pada penampang gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat transfer (e_{ii})

$$e_{ii} = y_{bti} - y_{mid}$$

Dimana,

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{mid})

Sehingga,

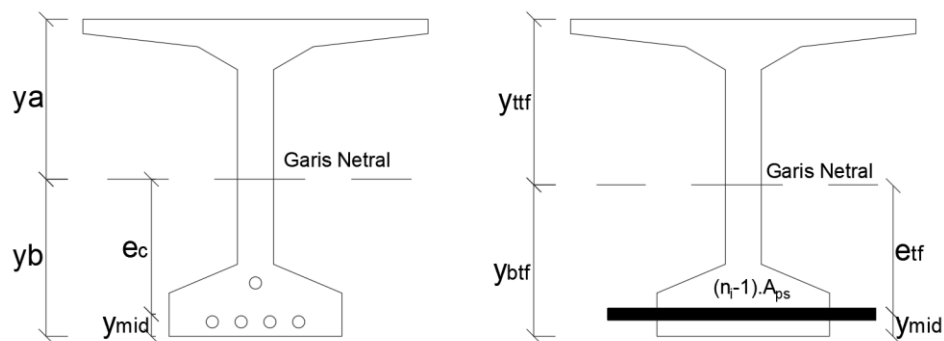
$$e_{ii} = y_{bti} - y_{mid}$$

$$e_{ii} = 1,0522 - 0,154$$

$$e_{ii} = 0,898 \text{ m}$$

- b. Properti penampang gelagar transformasi saat final

Properti penampang nonkomposit saat final ditentukan dengan cara mentransformasikan luas penampang tendon dengan mengalikan luas tendon dengan faktor $(n_f - 1)$, dimana n_f adalah rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas gelagar umur 28 hari (E_c). Penampang gelagar nonkomposit transformasi saat final ditunjukkan pada gambar 5.23 di bawah ini.



Gambar 5. 23 Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Final

Rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas beton gelagar nonkomposit saat final (n_f)

$$n_f = \frac{E_{ps}}{E_{cg}}$$

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 197000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari (E_{cg}) = 42037,07 MPa

Sehingga,

$$n_f = \frac{E_{ps}}{E_{cg}}$$

$$n_f = \frac{197000}{42037,07}$$

$$n_f = 4,69$$

Luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat final (A_{gtf})

$$A_{gtf} = A_g + (n_f - 1) \cdot A_{ps}$$

Dimana,

Luas penampang gelagar nonkomposit (A_g) = 1,312 m²

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,013 m²

Sehingga,

$$A_{gtf} = A_g + (n_f - 1) \cdot A_{ps}$$

$$A_{gtf} = 1,312 + (4,69 - 1) \cdot 0,013$$

$$A_{gtf} = 1,36 \text{ m}^2$$

Jarak dari garis netral ke tepi bawah penampang gelagar nonkomposit transformasi saat final (y_{btf})

$$y_{btf} = \frac{A_g \cdot y_b + (n_f - 1) \cdot A_{ps} \cdot y_{mid}}{A_{gtf}}$$

Dimana,

Luas penampang gelagar nonkomposit (A_g) = 1,312 m²

Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah (y_b) = 1,090 m

Jarak titik berat *strand* ke tepi bawah (y_{mid}) = 0,154 m

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,013 m²

Sehingga,

$$y_{btf} = \frac{A_g \cdot y_b + (n_f - 1) \cdot A_{ps} \cdot y_{mid}}{A_{gtf}}$$

$$y_{btf} = \frac{1,312 \cdot 1,090 + (4,69 - 1) \cdot 0,013 \cdot 0,154}{1,36}$$

$$y_{btf} = 1,057 \text{ m}$$

Jarak garis netral ke tepi atas penampang gelagar transformasi saat final (

y_{tff})

$$y_{tff} = h_g - y_{btf}$$

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g) = 2,2 m

Sehingga,

$$y_{tff} = h_g - y_{btf}$$

$$y_{tff} = 2,2 - 1,057$$

$$y_{tff} = 1,143 \text{ m}$$

Momen inersia penampang gelagar transformasi saat final (I_{tf})

$$I_{tf} = I_g + A_g \cdot (y_{btf} - y_b)^2 + I_s + (n_f - 1) \cdot A_{ps} \cdot (y_{btf} - y_{mid})^2$$

Dimana,

$$\text{Luas penampang gelagar (} A_g \text{)} = 1,312 \text{ m}^2$$

$$\text{Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah (} y_b \text{)} = 1,090 \text{ m}$$

$$\text{Jarak titik berat strand ke tepi bawah (} y_{mid} \text{)} = 0,154 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia strand (} I_s \text{)} = 24,892 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\text{Momen inersia gelagar (} I_g \text{)} = 0,917 \text{ m}^4$$

$$\text{Luas total strand (} A_{ps} \text{)} = 0,013 \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$I_{tf} = I_g + A_g \cdot (y_{btf} - y_b)^2 + I_s + (n_f - 1) \cdot A_{ps} \cdot (y_{btf} - y_{mid})^2$$

$$I_{tf} = 0,917 + 1,312 \cdot (1,057 - 1,090)^2 + 24,892 \cdot 10^{-8} + (4,69 - 1) \cdot 0,013 \cdot (1,057 - 0,154)^2$$

$$I_{tf} = 0,957 \text{ m}^4$$

Modulus penampang atas gelagar saat final (S_{tff})

$$S_{tff} = \frac{I_{tf}}{y_{tff}}$$

$$S_{tff} = \frac{0,957}{1,143}$$

$$S_{tff} = 0,837 \text{ m}^3$$

Modulus penampang atas gelagar saat final (S_{btf})

$$S_{btf} = \frac{I_{tf}}{y_{btf}}$$

$$S_{btf} = \frac{0,957}{1,057}$$

$$S_{btf} = 0,905 \text{ m}^3$$

Eksentrisitas tendon rata-rata pada penampang gelagar transformasi di tengah bentang saat final (e_{tf})

$$e_{tf} = y_{btf} - y_{mid}$$

Dimana,

Jarak pusat penampang tendon ke serat bawah gelagar (y_{mid}) = 0,154 m

Sehingga,

$$e_{tf} = y_{btf} - y_{mid}$$

$$e_{tf} = 1,057 - 0,154$$

$$e_{tf} = 0,903 \text{ mm}$$

2. Kehilangan prategang saat transfer

Kehilangan prategang pada fase saat transfer hingga pengecoran pelat diakibatkan oleh susut pada gelagar, relaksasi tendon, dan rangkai pada gelagar. Berikut perhitungan kehilangan prategang saat transfer hingga pengecoran pelat.

a. Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar (Δ_{fpSR})

Keliling penampang gelagar tengah (K_{llg})

Berdasarkan gambar 5.3 maka didapat keliling penampang gelagar sebagai berikut.

$$K_{llg} = 10,074 \text{ m}$$

Luas permukaan total gelagar (A_{surf_g})

$$A_{surf_g} = K_{llg} \cdot L_b + 2 \cdot A_g$$

Dimana,

$$\text{Panjang gelagar } (L_b) = 60,8 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang gelagar } (A_g) = 1,3118 \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$A_{surf_g} = K_{llg} \cdot L_b + 2 \cdot A_g$$

$$A_{surf_g} = 10,074 \cdot 60,8 + 2 \cdot 1,3118$$

$$A_{surf_g} = 615,107 \text{ m}^2$$

Volume gelagar (V_g)

$$V_g = A_g \cdot L_b$$

Dimana,

$$\text{Panjang gelagar } (L_b) = 60,8 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang gelagar } (A_g) = 1,3118 \text{ m}^2$$

Sehingga,

$$V_g = A_g \cdot L_b$$

$$V_g = 1,3118 \cdot 60,8$$

$$V_g = 79,758 \text{ m}^3$$

Rasio volume terhadap luas permukaan (r_{VS})

$$r_{VS} = \frac{V_g}{A_{surf_g}}$$

$$r_{VS} = \frac{79,758}{615,107}$$

$$r_{VS} = 129,667 \text{ mm}$$

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan yang ditinjau (k_s)

Nilai k_s dihitung dengan persamaan berikut.

$$k_s = 1,45 - 0,0051 \cdot r_{VS}$$

$$k_s = 1,45 - 0,0051 \cdot 129,667$$

$$k_s = 0,789$$

Dengan syarat $K_s \geq 1$. Karena nilai k_s pada perhitungan diatas kurang dari satu, maka nilai k_s yang dipakai adalah 1.

Kelembaban relative (H_r)

Berdasarkan BMKG kelembaban relatif umumnya berkisar 85%. Sehingga di asumsikan nilai H_r adalah 85%

Umur gelagar saat transfer (t_i)

Berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021 umur gelagar saat transfer diasumsikan

$$t_i = 7 \text{ hari}$$

Umur gelagar saat pengecoran pelat (t_d)

Berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021 umur gelagar saat pengecoran pelat diasumsikan sebesar $t_d = 120$ hari

Umur gelagar saat final (t_f)

Berdasarkan Sistem Manajemen Pengetahuan (SIMANTU) yang disediakan oleh kementrian PUPR, umur rencana untuk jembatan umum adalah 50 tahun. Maka umur gelagar saat final yaitu.

$$t_f = 50 \cdot 365$$

$$t_f = 18250 \text{ hari}$$

Faktor kelembaban untuk susut (k_{hs})

$$k_{hs} = 2 - 0,014 \cdot H_r$$

$$k_{hs} = 2 - 0,014 \cdot 85\%$$

$$k_{hs} = 1,988$$

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_f)

$$k_f = \frac{35}{7 + f'_{cig}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton awal saat transfer (f'_{cig}) = 64 MPa

Sehingga,

$$k_f = \frac{35}{7 + f'_{cig}}$$

$$k_f = \frac{35}{7 + 64}$$

$$k_f = 0,493$$

Perpanjangan waktu antara transfer dan pengecoran pelat (t_{di})

$$t_{di} = t_d - t_i$$

$$t_{di} = 120 - 7$$

$$t_{di} = 113 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer (k_{tddi})

$$k_{tddi} = \frac{t_{di}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{di}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton beton awal saat transfer (f'_{cig}) = 64 MPa

Sehingga,

$$k_{iddi} = \frac{t_{di}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{di}}$$

$$k_{iddi} = \frac{113}{61 - 0,58 \cdot 64 + 113}$$

$$k_{iddi} = 0,826$$

Regangan susut gelagar antara waktu transfer dan pengecoran pelat (ε_{bid})

$$\varepsilon_{bid} = k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{iddi} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{bid} = 1 \cdot 1,988 \cdot 0,493 \cdot 0,826 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{bid} = 0,00039$$

Faktor kelembaban untuk rangkai (k_{hc})

$$k_{hc} = 1,56 - 0,008 \cdot H_r$$

$$k_{hc} = 1,56 - 0,008 \cdot 85\%$$

$$k_{hc} = 1,553$$

Perpanjangan waktu antara transfer dan final (t_{fi})

$$t_{fi} = t_f - t_i$$

$$t_{fi} = 18250 - 7$$

$$t_{fi} = 18243 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara final dan transfer (k_{idfi})

$$k_{idfi} = \frac{t_{fi}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{fi}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton awal saat transfer (f'_{cig}) = 64 MPa

Sehingga,

$$k_{idfi} = \frac{t_{fi}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{fi}}$$

$$k_{idfi} = \frac{18243}{61 - 0,58 \cdot 64 + 18243}$$

$$k_{idfi} = 0,999$$

Koefisien rangkai gelagar saat waktu final karena pembebanan saat transfer (ψ_{tfii})

$$\psi_{tfii} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{idfi} \cdot t_i^{-0,118}$$

$$\psi_{tfii} = 1,9 \cdot 1 \cdot 1,553 \cdot 0,493 \cdot 0,998 \cdot 7^{-0,118}$$

$$\psi_{tfii} = 1,155$$

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terlekat dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara transfer dan pengecoran pelat (k_{id})

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot \frac{A_{ps}}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{A_g \cdot e_{mid}^2}{I_g}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{tfii})}$$

Dimana,

$$\text{Modulus elastisitas baja prategang } (E_{ps}) = 197000 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus elastisat gelagar saat transfer } (E_{cig}) = 37600 \text{ MPa}$$

$$\text{Luas total tendon } (A_{ps}) = 13300 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas penampang gelagar } (A_g) = 1311822,25 \text{ mm}^2$$

$$\text{Eksentrisitas tendon di tengah } (e_{mid}) = 936,4 \text{ mm}$$

$$\text{Momen inersia gelagar } (I_g) = 917194560629,345 \text{ mm}^4$$

Sehingga,

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot \frac{A_{ps}}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{A_g \cdot e_{mid}^2}{I_g}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{tfii})}$$

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{197000}{37600} \cdot \frac{13300}{1311822,25} \cdot \left(1 + \frac{1311822,25 \cdot 936,4^2}{917194560629,345}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot 1,490)}$$

$$k_{id} = 0,822$$

Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar (Δ_{fpSR})

$$\Delta_{fpSR} = \varepsilon_{bid} \cdot E_{ps} \cdot k_{id}$$

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 197000 MPa

Sehingga,

$$\Delta_{fpSR} = \varepsilon_{bid} \cdot E_{ps} \cdot k_{id}$$

$$\Delta_{fpSR} = 0,00039 \cdot 197000 \cdot 0,822$$

$$\Delta_{fpSR} = 62,889 \text{ MPa}$$

- b. Kehilangan prategang akibat relaksasi tendon (Δ_{fpR1})

Kehilangan prategang akibat relaksasi tendon rentang waktu transfer hingga pengecoran pelat (Δ_{fpR1}) berdasarkan sub bab 3.7 diasumsikan sebesar 1,2 ksi atau 8 MPa untuk *low relaxation strand*.

$$\Delta_{fpR1} = 8 \text{ MPa}$$

- c. Kehilangan prategang akibat rangkai pada gelagar (Δ_{fpCR})

Tegangan saat setelah transfer pada strand (f_{pi2})

$$f_{pi2} = f_{pbt} - (\Delta_{fpES} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpR1})$$

Dimana,

Tegangan baja prategang sebelum transfer (f_{pbt}) = 1395 MPa

Kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis (Δ_{fpES}) = 63,847 MPa

Kehilangan gaya prategang akibat gesekan (Δ_{fpF}) = 85,799 MPa

Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi tendon (Δ_{fpR1}) = 8 MPa

Sehingga,

$$f_{pi2} = f_{pbt} - (\Delta_{fpES} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpR1})$$

$$f_{pi2} = 1395 - (63,847 + 85,799 + 8)$$

$$f_{pi2} = 1237,354 \text{ MPa}$$

Gaya prategang saat setelah transfer (P_i)

$$P_i = f_{pi2} \cdot A_{ps}$$

Dimana,

Luas total tendon (A_{ps}) = 13300 mm²

Sehingga,

$$P_i = f_{pi2} \cdot A_{ps}$$

$$P_i = 1237,354 \cdot 13300$$

$$P_i = 16456,811 \text{ kN}$$

Tegangan di beton pada level tendon saat setelah transfer (f_{cgpi})

$$f_{cgpi} = \left| \frac{-P_i}{A_{gti}} - \frac{P_i \cdot e_{ti}}{I_{ti}} + \frac{M_{MS-G} \cdot e_{ti}}{I_{ti}} \right|$$

Dimana,

Luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat transfer (A_{gti}) = 1,36712 m²

Eksentrisitas tendon rata-rata pada gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat transfer (e_{ti}) = 0,898 m

Momen inersia penampang gelagar transformasi saat transfer (I_{ti}) = 0,963 m⁴

Momen akibat berat sendiri gelagar (M_{MS-G}) = 17666,057 kNm

Sehingga,

$$f_{cgpi} = \left| \frac{-P_i}{A_{gti}} - \frac{P_i \cdot e_{ti}}{I_{ti}} + \frac{M_{MS-G} \cdot e_{ti}}{I_{ti}} \right|$$

$$f_{cgpi} = \left| \frac{-16456,811}{1,36712} - \frac{16456,811 \cdot 0,830}{0,963} + \frac{17666,057 \cdot 0,889}{0,963} \right|$$

$$f_{cgpi} = 16,532 \text{ MPa}$$

Koefisien rangkai gelagar saat waktu transfer dan penempaan pelat karena pembebanan saat transfer (ψ_{tdti})

$$\psi_{tdti} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{tdti} \cdot t_i^{-0,118}$$

Dimana,

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan yang ditinjau (k_s)= 1

Faktor kelembaban untuk rangkai (k_{hc})= 1,553

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_f)= 0,493

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer (k_{tdi})= 0,826

Umur gelagar saat transfer (t_i)= 7 hari

Sehingga,

$$\psi_{tdi} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{tdi} \cdot t_i^{-0,118}$$

$$\psi_{tdi} = 1,9 \cdot 1 \cdot 1,553 \cdot 0,493 \cdot 0,826 \cdot 7^{-0,118}$$

$$\psi_{tdi} = 0,955$$

Kehilangan prategang akibat rangkai pada gelagar (Δ_{fpCR})

$$\Delta_{fpCR} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgpi} \cdot \psi_{tdi} \cdot k_{id}$$

Dimana,

$$\text{Modulus elastisitas baja prategang } (E_{ps}) = 197000 \text{ MPa}$$

$$\text{Modulus elastisitas gelagar saat transfer } (E_{cig}) = 37600 \text{ MPa}$$

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terlekat dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara transfer dan pengecoran pelat (k_{id})= 0,822

Sehingga,

$$\Delta_{fpCR} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgpi} \cdot \psi_{tdi} \cdot k_{id}$$

$$\Delta_{fpCR} = \frac{197000}{37600} \cdot 16,532 \cdot 0,955 \cdot 0,822$$

$$\Delta_{fpCR} = 67,965 \text{ MPa}$$

5.2.4.3 Gaya Prategang Efektif Akhir

Pada subbab 5.2.4.3 telah dilakukan perhitungan kehilangan prategang. Berikut hasil rekapitulasi perhitungan kehilangan prategang dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 19 Rekapitulasi Kehilangan Prategang pada Tengah Bentang

Fase Kehilangan Prategang	Kehilangan Prategang	Notasi	Nilai	Satuan
Saat Transfer (jangka pendek)	Akibat gesekan	Δ_{fpF}	44,041	Mpa
	Akibat pergeseran ankur	Δ_{fpA}	17,898	Mpa
	Akibat perpendekan elastis	Δ_{fpES}	63,847	Mpa
Saat transfer hingga final (jangka panjang)	Akibat susut pada gelagar	Δ_{fpSR}	62,889	Mpa
	Akibat relaksasi tendon	Δ_{fpR1}	8	Mpa
	Akibat rangkai pada gelagar	Δ_{fpCR}	67,965	Mpa

1. Total Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan prategang seketika

$$\Delta_{fpF} + \Delta_{fpA} + \Delta_{fpES} = 44,041 + 17,898 + 63,847$$

$$\Delta_{fpF} + \Delta_{fpA} + \Delta_{fpES} = 125,786 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang jangka panjang (Δ_{fpLT})

$$\Delta_{fpLT} = \Delta_{fpSR} + \Delta_{fpCR} + \Delta_{fpR1}$$

$$\Delta_{fpLT} = 62,889 + 67,965 + 8$$

$$\Delta_{fpLT} = 138,853 \text{ Mpa}$$

Total kehilangan gaya prategang (Δ_{fpT})

$$\Delta_{fpT} = \Delta_{fpA} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpES} + \Delta_{fpLT}$$

$$\Delta_{fpT} = 125,786 + 138,853$$

$$\Delta_{fpT} = 264,640 \text{ MPa}$$

Presentase kehilangan prategang

$$losses_final = \left(\frac{\Delta_{fpT}}{f_{pu}} \cdot 100\% \right)$$

Dimana,

Tegangan putus baja prategang (f_{pu}) = 1860 MPa

Sehingga,

$$losses_final = \left(\frac{\Delta_{fpT}}{f_{pu}} \cdot 100\% \right)$$

$$losses_final = \left(\frac{264,640}{1860} \cdot 100\% \right)$$

$$losses_final = 14,228\%$$

2. Gaya Prategang Efektif

Tegangan prategang efektif maksimal ($Maxf_{pe}$)

Berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021, tegangan prategang efektif maksimal dihitung dengan persamaan berikut.

$$Maxf_{pe} = 0,8 \cdot f_{py}$$

Dimana,

Tegangan leleh baja prategang (f_{py})

Sehingga,

$$Maxf_{pe} = 0,8 \cdot f_{py}$$

$$Maxf_{pe} = 0,8 \cdot 1674$$

$$Maxf_{pe} = 1339,2 \text{ MPa}$$

Tegangan prategang efektif aktual setelah kehilangan (f_{pe})

$$f_{pe} = 75\% \cdot f_{pu} - \Delta_{fpT}$$

Dimana,

Total kehilangan gaya prategang (Δ_{fpT}) = 264,640 MPa

Tegangan putus baja prategang (f_{pu}) = 1860 MPa

Sehingga,

$$f_{pe} = 75\% \cdot f_{pu} - \Delta_{fpT}$$

$$f_{pe} = 75\% \cdot 1860 - 264,640$$

$$f_{pe} = 1130,360 \text{ Mpa}$$

Periksa batas maksimum prategang efektif

Syarat $f_{pe} \leq Maxf_{pe}$

Karena nilai $f_{pe} = 1130,360 \leq Maxf_{pe} = 1339,2$ maka perhitungan sudah memenuhi syarat.

3. Gaya prategang efektif (P_{ef})

$$P_{ef} = A_{ps} \cdot f_{pe}$$

Dimana,

Luas total *strand* (A_{ps}) = 13300 mm²

Sehingga,

$$P_{ef} = 13300 \cdot 1130,360$$

$$P_{ef} = 15033792,958 \text{ N}$$

$$P_{ef} = 15033,793 \text{ kN}$$

5.2.5 Pemeriksaan Tegangan

Tegangan yang terjadi pada beton prategang memiliki batasan, sehingga dilakukan pemeriksaan. Berikut adalah tegangan izin pada beton prategang.

$$\text{Kuat tekan beton umur 28 hari } (f ' _{cg}) = 80 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Kuat tekan beton awal saat transfer } (f ' _{cig}) &= 0,8 \cdot f ' _{cg} \\ &= 64 \text{ MPa} \end{aligned}$$

1. Tegangan Izin Beton kondisi transfer

$$\text{Tarik} : \sigma_{t_i} = 0,25 \sqrt{f ' _{cig}} = 0,25 \sqrt{64} = 2 \text{ MPa}$$

$$\text{Tekan} : \sigma_{c_i} = -0,6 \cdot f ' _{cig} = -0,6 \cdot 64 = -38,4 \text{ Mpa}$$

2. Tegangan izin Beton Kondisi Layan

$$\text{Tarik} : \sigma_{t_{serv}} = 0,5 \cdot \sqrt{f ' _{cg}} = 0,5 \cdot \sqrt{80} = 4,472 \text{ MPa}$$

$$\text{Tekan} : \sigma_{c_{serv}} = -0,45 \cdot f ' _{cg} = -0,45 \cdot 80 = -36 \text{ MPa}$$

Setelah ditentukan tegangan izin, selanjutnya lakukan pemeriksaan yang terdiri dari 3 tahap, yaitu saat transfer, saat konstruksi, dan saat layan.

1. Pemeriksaan tegangan penampang saat transfer

Gaya prategang *jacking* ($p_{jacking}$)

$$p_{jacking} = 0,75 \cdot f_{pu} \cdot A_{ps}$$

Dimana,

$$\text{Tegangan putus baja prategang } (f_{pu}) = 1860 \text{ MPa}$$

$$\text{Luas total } strand (A_{ps}) = 13300 \text{ mm}^2$$

Sehingga,

$$p_{jacking} = 0,75 \cdot f_{pu} \cdot A_{ps}$$

$$p_{jacking} = 0,75 \cdot 1860 \cdot 13300$$

$$p_{jacking} = 18553,5 \text{ kN}$$

Kehilangan prategang saat transfer (Δ_{pST})

$$\Delta_{pST} = \Delta_{fpA} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpES}$$

$$\Delta_{pST} = 17,898 + 44,041 + 63,841$$

$$\Delta_{pST} = 125,786 \text{ MPa}$$

Gaya prategang inisial ($P_{transfer}$)

$$P_{transfer} = P_{jacking} - \Delta_{pST} \cdot A_{ps}$$

$$P_{transfer} = 18553,5 - 125,786 \cdot 13300$$

$$P_{transfer} = 16880543 \text{ N}$$

$$P_{transfer} = 16880,543 \text{ kN}$$

Tegangan pada serat atas penampang (f_{t-i})

$$f_{t-i} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{MS-G}}{S_t}$$

$$f_{t-i} = \frac{-16880,543}{1,3118} + \frac{16880,543 \cdot 0,936}{0,8265} + \frac{-17666,058}{0,8265}$$

$$f_{t-i} = -15117 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t-i} = -15,117 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas saat transfer

$$\text{Syarat: } |f_{t-i}| \leq |\sigma_{ci}|$$

Karena $|f_{t-i}| = 15,117 \text{ MPa} \leq |\sigma_{ci}| = 38,4 \text{ MPa}$ maka tegangan atas saat transfer memenuhi syarat.

Tegangan pada serat bawah penampang (f_{b-i})

$$f_{b-i} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{-P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_b} + \frac{M_{MS-G}}{S_b}$$

$$f_{b-i} = \frac{-16880,543}{1,3118} + \frac{-16880,543 \cdot 0,936}{0,8411} + \frac{17666,058}{0,8411}$$

$$f_{b-i} = -10658 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{b-i} = -10,658 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan bawah saat transfer

$$\text{Syarat: } |f_{b_i}| \leq |\sigma_{c_i}|$$

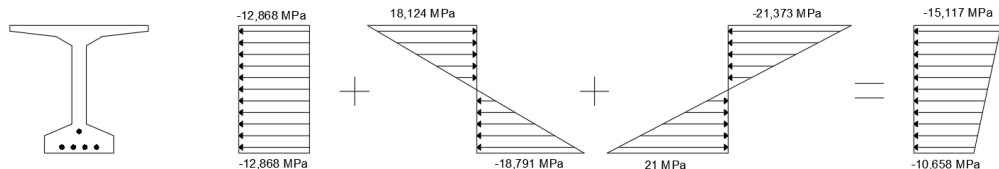
Karena $|f_{b_i}| = 10,658 \text{ MPa} \leq |\sigma_{c_i}| = 38,4 \text{ MPa}$ maka tegangan bawah saat transfer memenuhi syarat.

Berikut hasil rekapitulasi dari perhitungan di atas, dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 20 Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Transfer

Lokasi	$\frac{P_{transfer}}{A_g}$	$\frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S}$	$\frac{M_{MS_G}}{S}$	Total
	MPa	MPa	MPa	MPa
Serat atas gelagar	-12,868	18,124	-21,373	-15,117
Serat bawah gelagar	-12,868	-18,791	21	-10,658

Dari tabel 5.20 diatas dapat digambarkan menjadi diagram tegangan seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 24 Diagram Tegangan Penampang saat Transfer

2. Pemeriksaan tegangan penampang pada masa konstruksi

Momen saat berat mati sendiri (M_{Ms})

$$M_{Ms} = M_{MS_S} + M_{MS_G} + M_{MS_D}$$

Dimana,

$$\text{Momen akibat pelat lantai } (M_{MS_S}) = 4332000000 \text{ Nmm}$$

$$\text{Momen akibat diafragma } (M_{MS_D}) = 153900000 \text{ Nmm}$$

$$\text{Momen akibat gelagar } (M_{MS_G}) = 17666057728 \text{ Nmm}$$

Sehingga,

$$M_{Ms} = 4332000000 + 17666057728 + 1539000000$$

$$M_{Ms} = 22151957728 \text{ Nmm}$$

$$M_{Ms} = 22151,957728 \text{ kNm}$$

Tegangan pada serat atas penampang (f_{t_kons})

$$f_{t_kons} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{Ms}}{S_t}$$

$$f_{t_kons} = \frac{-16880,543}{1,3118} + \frac{16880,543 \cdot 0,936}{0,826} + \frac{-22151,95}{0,826}$$

$$f_{t_kons} = -20544 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t_kons} = -20,544 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas saat konstruksi

$$\text{Syarat : } |f_{t_kons}| \leq |\sigma_{ci}|$$

Karena $|f_{t_kons}| = 20,544 \text{ MPa} \leq |\sigma_{ci}| = 36 \text{ MPa}$ maka tegangan atas saat konstruksi memenuhi syarat.

Tegangan pada serat bawah penampang (f_{b_kons})

$$f_{b_kons} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{-P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_b} + \frac{M_{Ms}}{S_b}$$

$$f_{b_kons} = \frac{-16880,543}{1,3118} + \frac{-16880,543 \cdot 0,936}{0,8411} + \frac{22151,95}{0,8411}$$

$$f_{b_kons} = -5,325 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan bawah saat konstruksi

$$\text{Syarat : } |f_{b_kons}| \leq |\sigma_{ci}|$$

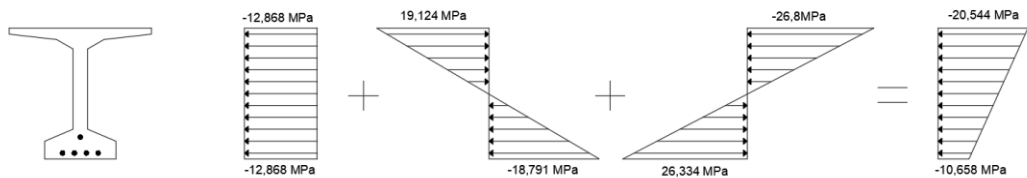
Karena $|f_{b_kons}| = 5,325 \text{ MPa} \leq |\sigma_{ci}| = 36 \text{ MPa}$ maka tegangan atas saat konstruksi memenuhi syarat.

Hasil perhitungan diatas dapat direkapitulasi seperti pada tabel di bawah ini

Tabel 5. 21 Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Konstruksi

Lokasi	$\frac{P_{transfer}}{A_g}$	$\frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S}$	$\frac{M_{MS_G}}{S}$	Total
	MPa	MPa	MPa	MPa
Serat atas gelagar	-12,868	19,124	-26,8	-20,544
Serat bawah gelagar	-12,868	-18,791	26,334	-5,325

Dari Tabel dapat digambarkan menjadi diagram tegangan seperti pada gambar dibawah ini.

**Gambar 5. 25 Diagram Tegangan Penampang saat Konstruksi**

3. Pemeriksaan tegangan penampang pada kondisi layan

Momen akibat beban mati tambahan (M_{MA})

$$M_{MA} = M_{MA_w} + M_{MA_A} + M_{MA_br} + M_{MA_tr}$$

Dimana,

$$\text{Momen akibat beban air hujan } (M_{MA_w}) = 566 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban barrier } (M_{MA_br}) = 1732 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban trotoar } (M_{MA_tr}) = 866,4 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban aspal } (M_{MA_A}) = 1270,72 \text{ kNm}$$

Sehingga,

$$M_{MA} = 566 + 1732 + M_{MA_br} + M_{MA_tr}$$

$$M_{MA} = 566 + 1732 + 866,4 + 1270,72$$

$$M_{MA} = 4435,968 \text{ kNm}$$

Momen akibat beban hidup (M_{LL})

$$M_{LL} = M_{TD} + M_{TP} + M_{TB}$$

Dimana,

$$\text{Momen akibat pejalan kaki } (M_{TP}) = 1152,2 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban lajur "D" } (M_{TD}) = 10319 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat gaya rem } (M_{TB}) = 65,468 \text{ kNm}$$

Sehingga,

$$M_{LL} = M_{TD} + M_{TP} + M_{TB}$$

$$M_{LL} = 1152,2 + 10319 + 65,468$$

$$M_{LL} = 11540,594 \text{ kNm}$$

Tegangan pada serat atas penampang (f_{t_layan})

$$f_{t_layan} = \frac{-P_{eff}}{A_g} + \frac{P_{eff} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{MS} - M_{MA} - M_{LL}}{S_t}$$

$$f_{t_layan} = \frac{-15033,792}{1,311} + \frac{15033,792 \cdot 0,936}{0,826} + \frac{-22151,98 - 4435,968 - 11540,59}{0,826}$$

$$f_{t_layan} = -32511 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t_layan} = -32,511 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas saat layan

$$\text{Syarat } |f_{t_layan}| \leq |\sigma_{c_serv}|$$

Karena $|f_{t_layan}| = 32,511 \text{ MPa} < |\sigma_{c_serv}| = 36 \text{ MPa}$ maka tegangan atas saat layan memenuhi syarat.

Tegangan pada serat bawah penampang (f_{b_layan})

$$f_{b_layan} = \frac{-P_{eff}}{A_g} + \frac{-P_{eff} \cdot e_{mid}}{S_b} + \frac{M_{MS} + M_{MA} + M_{LL}}{S_b}$$

$$f_{b_layan} = \frac{-15033,79}{1,311} + \frac{-15033,79 \cdot 0,936}{0,841} + \frac{22151,98 + 4435,96 + 11540,59}{0,841}$$

$$f_{b_layan} = 17131 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{b_layan} = 17,131 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan bawah saat layan

$$\text{Syarat : } |f_{b_layan}| \leq |\sigma_{c_serv}|$$

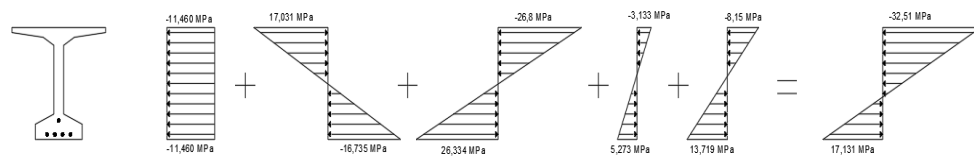
Karena $|f_{b_layan}| = 17,131 \text{ MPa} < |\sigma_{c_serv}| = 36 \text{ MPa}$ maka tegangan bawah saat layan memenuhi syarat.

Rekapitulasi hasil perhitungan dapat dilihat pada gambar di bawah ini.

Tabel 5. 22 Tegangan Penampang saat Kondisi Layan

Lokasi	$\frac{P_{eff}}{A_g}$	$\frac{P_{eff} \cdot e_{mid}}{S}$	$\frac{M_{MS}}{S}$	$\frac{M_{MA}}{S}$	$\frac{M_{LL}}{S}$	Total
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
Serat atas gelagar	-11,460	17,031	-26,800	-3,133	-8,150	-32,51
Serat bawah gelagar	-11,460	-16,735	26,334	5,273	13,719	17,131

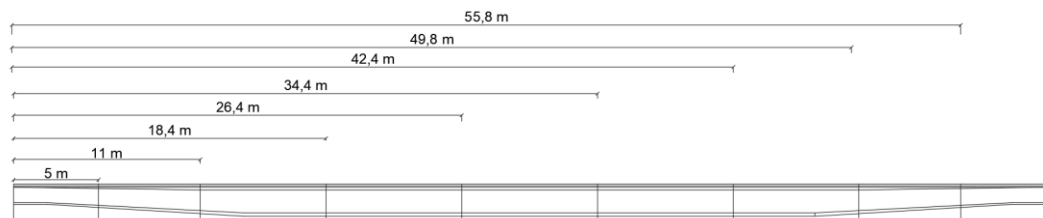
Dari Tabel dapat digambarkan menjadi diagram tegangan seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 26 Diagram Tegangan Penampang saat Layan

4. Pemeriksaan tegangan penampang saat layan di sambungan

Pemeriksaan tegangan pada sambungan gelagar yang terletak di titik 5 m, 11 m, 18,4 m, 26,4 m, 34,4 m, 42,4 m, 49,8 m dan 55,8 m dari penampang sisi kiri seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 5. 27 Letak Sambungan pada Gelagar

Nilai momen yang bekerja pada titik-titik sambungan yang ditinjau dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$M = (R_v \cdot X) - (0,5 \cdot W \cdot X^2)$$

$$R_v = 0,5 \cdot W \cdot L$$

Dengan persamaan di atas maka didapatkan hasil rekapitulasi seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 23 Momen yang bekerja pada Sambungan

No	Pembebanan	Besar Beban (W) (kN/m)	Reaksi Vertikal (Rv) (kN)	Momen di Sambungan (kNm)			
				X=5	X=11	X=18,4	X=26,4
1	Pelat lantai	9,4	285	1307,8	2567,8	3657,0	4257,0
2	Gelagar	38,2	1162,2	5333,3	10471,7	14913,4	17360,2
3	Diafragma	0,5	13,8	63,5	124,8	177,7	206,8
4	Aspal	2,8	83,6	383,6	753,2	1072,7	1248,7
5	Air hujan	1,2	37,2	170,9	335,5	477,8	556,2
6	Trotoar	1,9	57	261,6	513,6	731,4	851,4
7	<i>Barrier</i>	3,8	114	523,1	1027,1	1462,8	1702,8
8	Angin	2,4	72,6	333,3	654,4	931,9	1084,8
9	Beban merata lajur "D"	16,8	510,8	2343,7	4601,8	6553,7	7629,0
10	Beban titik lajur "D"	168,2	84,1	420,5	925,1	1547,4	2220,1
11	Pejalan kaki	2,5	114	348,8	684,8	975,2	1135,2
12	Rem			130,9	130,9	130,9	130,9

Setelah menghitung momen yang bekerja pada sambungan, maka perlu dihitung pula perhitungan gaya prategang efektif dan kehilangan gaya prategang pada titik sambungan. Berikut hasil perhitungan gaya prategang efektif dan kehilangan gaya prategang pada sambungan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. 24 Gaya Prategang Efektif dan Kehilangan Prategang pada Sambungan

X	Δ_{fpF}	Δ_{fpA}	Δ_{fpES}	Δ_{fpLT}	Total	f_{ef}	P_{ef}
(m)	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	kN
5	7,250	90,895	63,847	138,853	300,845	1094,155	14552,264
11	15,950	73,968	63,847	138,853	292,618	1102,382	14661,678
18,4	26,680	53,092	63,847	138,853	282,472	1112,528	14796,621
26,4	38,280	30,523	63,847	138,853	271,503	1123,497	14942,506
34,4	49,880	7,954	63,847	138,853	260,534	1134,466	15088,391
42,4	61,480	-14,615	63,847	138,853	249,566	1145,434	15234,277
49,8	72,210	-35,491	63,847	138,853	239,420	1155,580	15369,220
55,8	80,910	-52,417	63,847	138,853	231,193	1163,807	15478,634

Setelah dilakukan perhitungan kehilangan prategang di sambungan kemudian dilakukan pemeriksaan tegangan pada serat atas dan bawah sambungan gelagar seperti pada tabel 5.25 dan tabel 5.26 dibawah ini.

Tabel 5. 25 Pemeriksaan Tegangan pada Serat Atas Sambungan Gelagar

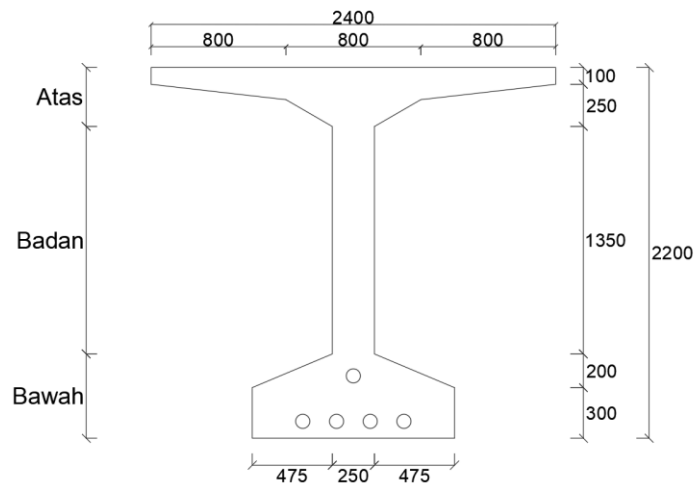
X	Eksentrisitas	Momen (kNm)			Tegangan (MPa)						Cek
		(m)	(mm)	M_{MS}	M_{MA}	M_{LL}	$-\frac{P_{ef}}{A_g}$	$\frac{P_{ef} \cdot e}{S}$	$-\frac{M_{MS}}{S}$	$-\frac{M_{MA}}{S}$	
5	286	6704	1339	3243	-11,1	5	-8,1	-0,9	-2,3	-17,4	OK
11	560	13164	2629	6342	-11,2	9,9	-15,9	-1,9	-4,5	-23,5	OK
18,4	796	18748	9225	9207	-11,3	14,3	-22,7	-6,5	-6,5	-32,7	OK
26,4	922	21824	4359	11115	-11,4	16,7	-26,4	-3,1	-7,8	-32	OK
34,4	916	21824	4359	11115	-11,5	16,7	-26,4	-3,1	-7,8	-32,1	OK
42,4	776	18748	9225	9207	-11,6	14,3	-22,7	-6,5	-6,5	-33	OK
49,8	528	13164	2629	6342	-11,7	9,9	-15,9	-1,9	-4,5	-24,2	OK
55,8	243	6704	1339	3243	-11,8	5	-8,1	-0,9	-2,3	-18,6	OK

Tabel 5. 26 Pemeriksaan Tegangan pada Serat Bawah Sambungan Gelagar

X	Eksentrisitas	Momen (kNm)			Tegangan (MPa)						Cek
		M_{MS}	M_{MA}	M_{LL}	$-\frac{P_{ef}}{A_g}$	$-\frac{P_{ef} \cdot e}{S}$	$\frac{M_{MS}}{S}$	$\frac{M_{MA}}{S}$	$\frac{M_{LL}}{S}$	Total	
5	286	6704	1339	3243	-11,1	-4,9	8	1,6	3,9	-2,6	OK
11	560	13164	2629	6342	-11,2	-9,8	15,6	3,1	7,5	5,4	OK
18,4	796	18748	9225	9207	-11,3	-14	22,3	11	10,9	18,9	OK
26,4	922	21824	4359	11115	-11,4	-16,4	25,9	5,2	13,2	16,6	OK
34,4	916	21824	4359	11115	-11,5	-16,4	25,9	5,2	13,2	16,4	OK
42,4	776	18748	9225	9207	-11,6	-14,1	22,3	11	10,9	18,5	OK
49,8	528	13164	2629	6342	-11,7	-9,7	15,6	3,1	7,5	4,9	OK
55,8	243	6704	1339	3243	-11,8	-4,5	8	1,6	3,9	-2,9	OK

5.2.6 Desain Penulangan Nonprategang Gelagar

Perhitungan penulangan nonprategang dilakukan dengan cara membagi gelagar menjadi 3 bagian, yaitu bagian atas, bagian tengah dan bagian bawah gelagar. Pembagian gelagar dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 5. 28 Pembagian Bagian Gelagar Nonprategang untuk Perhitungan Penulangan

Diameter tulangan pakai nonprategang (D)= 13 mm

Luas tulangan (A_s)

$$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2$$

$$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,13^2$$

$$A_s = 0,000133 \text{ m}^2$$

1. Bagian atas gelagar

Luas tampang bagian atas (A_{atas}) = 0,46932 m²

Luas tulangan bagian atas (A_{s_atas})

$$A_{s_atas} = 0,5\% \cdot A_{atas}$$

$$A_{s_atas} = 0,5\% \cdot 0,46932$$

$$A_{s_atas} = 0,002346 \text{ m}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan (n_{atas})

$$n_{atas} = \frac{A_{s_atas}}{A_s}$$

$$n_{atas} = \frac{0,002346}{0,000133}$$

$$n_{atas} = 17,679$$

Digunakan jumlah tulangan yang dipakai 20 D 13

2. Bagian badan gelagar

Luas tampang bagian badan (A_{badan}) = 0,3375 m²

Luas tulangan bagian badan (A_{s_badan})

$$A_{s_badan} = 0,5\% \cdot A_{badan}$$

$$A_{s_badan} = 0,5\% \cdot 0,3375$$

$$A_{s_badan} = 0,0016875 \text{ m}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan (n_{badan})

$$n_{badan} = \frac{A_{s_badan}}{A_s}$$

$$n_{\text{badan}} = \frac{0,0016875}{0,000133}$$

$$n_{\text{badan}} = 12,713$$

Digunakan jumlah tulangan yang dipakai 14 D 13

3. Bagian bawah gelagar

Luas tampang bagian bawah (A_{bawah}) = 0,47729 m²

Luas tulangan bagian bawah (A_{S_bawah})

$$A_{S_bawah} = 0,5\% \cdot A_{\text{bawah}}$$

$$A_{S_bawah} = 0,5\% \cdot 0,47729$$

$$A_{S_bawah} = 0,002386 \text{ m}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan (n_{bawah})

$$n_{\text{bawah}} = \frac{A_{S_bawah}}{A_S}$$

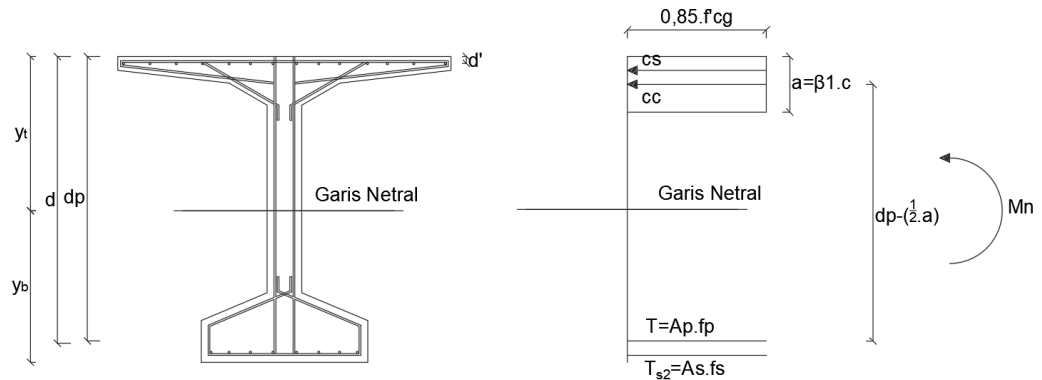
$$n_{\text{bawah}} = \frac{0,002386}{0,000133}$$

$$n_{\text{bawah}} = 17,979$$

Digunakan jumlah tulangan yang dipakai 20 D 13

5.2.7 Kapasitas Lentur Penampang

Perhitungan kapasitas lentur penampang dilakukan dengan engacu pada diagram tegangan gelagar seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 29 Diagram Tegangan Gelagar

1. Tegangan Tarik strand (f_{ps})

Tegangan Tarik *strand* dihitung dengan persamaan berikut

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left[\rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_{cg}} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right] \right)$$

Dimana,

Kuat Tarik strand (f_{pu})

Kuat tekan beton (f'_{cg})

Tegangan leleh *strand* (f_{py})

Nilai γ_p

$$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = 0,9 \text{ maka berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 18.7.2 nilai } \gamma_p = 0,28$$

Nilai β_1

$$\beta_1 = 0,85 - \left(\frac{f'_{cg} - 28}{7} \cdot 0,05 \right)$$

$$\beta_1 = 0,85 - \left(\frac{80 - 28}{7} \cdot 0,05 \right)$$

$$\beta_1 = 0,47857$$

Rasio tulangan prategang (ρ_p)

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{A_c}$$

Dimana,

$$\text{Luas strand } (A_{ps}) = 13300 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas total penampang beton } (A_c) = 1311822,25 \text{ mm}^2$$

Sehingga,

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{A_c}$$

$$\rho_p = \frac{13300}{1311822,25}$$

$$\rho_p = 0,010138$$

Luas tampang tulangan tarik nonprategang (A_s)

$$A_s = 12 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

Dimana,

Diameter tulangan nonprategang (d)

Sehingga,

$$A_s = 12 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

$$A_s = 12 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2$$

$$A_s = 1592,787 \text{ mm}^2$$

Luas tampang tulangan tekan nonprategang (A_s')

$$A_s' = 12 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

$$A_s' = 12 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2$$

$$A_s' = 1592,787 \text{ mm}^2$$

Rasio tulangan Tarik nonprategang (ρ)

$$\rho = \frac{A_s}{A_c}$$

$$\rho = \frac{1592,787}{1311822,25}$$

$$\rho = 0,001214$$

Rasio tulangan tekan nonprategang (ρ')

$$\rho' = \frac{A_s}{A_c}$$

$$\rho' = \frac{1592,787}{1311822,25}$$

$$\rho' = 0,001214$$

Nilai ω

$$\omega = \rho \cdot \frac{f_y}{f'_{cg}}$$

Dimana,

Tegangan leleh tulangan nonprategang (f_y) = 420 MPa

Sehingga,

$$\omega = \rho \cdot \frac{f_y}{f'_{cg}}$$

$$\omega = 0,001214 \cdot \frac{420}{80}$$

$$\omega = 0,006374$$

Nilai ω'

$$\omega' = \rho' \cdot \frac{f_y}{f'_{cg}}$$

$$\omega' = 0,001214 \cdot \frac{420}{80}$$

$$\omega' = 0,006374$$

Kedalaman tulangan prategang (d_p)

$$d_p = h_g - y_{mid}$$

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g)

Jarak sisi bawah gelagar ke titik berat *strand* (y_{mid})

Sehingga,

$$d_p = h_g - y_{mid}$$

$$d_p = 2200 - 150$$

$$d_p = 2046 \text{ mm}$$

Kedalaman tulangan Tarik nonprategang (d_s)

$$d_s = h_g - 50$$

$$d_s = 2200 - 50$$

$$d_s = 2150 \text{ mm}$$

Kedalaman rata-rata strand dan tulangan nonprategang (d)

$$d = \frac{A_{ps} \cdot d_p + A_s \cdot d_s}{A_{ps} \cdot A_s}$$

$$d = \frac{13300 \cdot 2046 + 1592,787 \cdot 2150}{13300 \cdot 1592,787}$$

$$d = 2057,122$$

Tegangan Tarik *strand* (f_{ps})

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left[\rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_{cg}} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right] \right)$$

$$f_{ps} = 1860 \cdot \left(1 - \frac{0,28}{0,478} \cdot \left[0,01013 \cdot \frac{1860}{80} + \frac{2057,122}{2046} \cdot (0,006374 - 0,006374) \right] \right)$$

$$f_{ps} = 1603,478 \text{ MPa}$$

Karena nilai $f_{ps} = 1603,478 \text{ MPa} < f_{py} = 1674 \text{ MPa}$ maka nilai f_{ps} sudah memenuhi syarat.

2. Gaya Tarik *strand* (T)

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

$$T = 13300 \cdot 1603,478$$

$$T = 21326263,711 \text{ N}$$

$$T = 21326,263 \text{ kN}$$

3. Luas blok tekan (A_{cc})

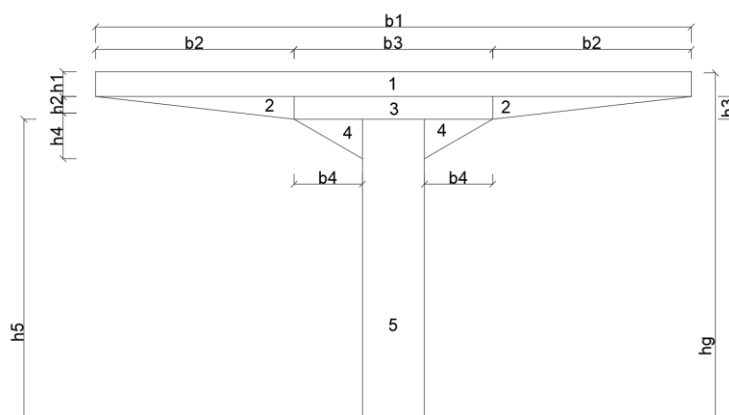
$$A_{cc} = \frac{T}{0,85 \cdot f'_{cg}}$$

$$A_{cc} = \frac{21326263,711}{0,85 \cdot 80}$$

$$A_{cc} = 313621,525 \text{ mm}^2$$

$$A_{cc} = 0,313621 \text{ m}^2$$

4. Kedalaman blok tekan



Gambar 5. 30 Potongan Penampang Gelagar

Berdasarkan perhitungan pada subbab 5.2.1 didapatkan hasil sebagai berikut.

$$\text{Luas penampang 2 (} A_2 \text{)} = 0,31298 \text{ m}^2$$

$$\text{Luas penampang 3 (} A_3 \text{)} = 0,38596 \text{ m}^2$$

Karena $A_2 < A_{cc} < A_3$ maka kedalaman luas blok tekan dapat dihitung sebagai berikut.

$$A_3' = A_{cc} - A_2$$

$$A_3' = 0,31362 - 0,31298$$

$$A_3' = 0,0006375 \text{ m}^2$$

$$h_3' = \frac{A_3'}{b_3}$$

$$h_3' = \frac{0,000637}{0,8}$$

$$h_3' = 0,000796 \text{ m}$$

Kedalaman blok tekan (a)

$$a = h_1 + h_2 + h_3'$$

$$a = 0,1 + 0,09123 + 0,000796$$

$$a = 0,192 \text{ m}$$

5. Titik berat blok tekan (y_{cc})

Perhitungan data penampang blok tekan dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. 27 Rekapitulasi Penampang Blok Tekan

No	Dimensi		Luas Tampang	Jarak Titik Berat Tampang Terhadap Alas	Statis Momen
	Lebar	Tinggi			
	b_i	h_i	A_i	y_i	$A_i \cdot y_i$
	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m ³)
1	2,4	0,1	0,240	2,150	0,516
2	0,8	0,09123	0,073	2,070	0,151
3	0,8	0,0008	0,0006375	0,19163	0,00012
TOTAL			0,31362		0,02275

Titik berat blok tekan (y_{cc})

$$y_{cc} = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}$$

$$y_{cc} = \frac{0,02275}{0,31362}$$

$$y_{cc} = 0,0725 \text{ m}$$

6. Kapasitas lentur penampang (M_n)

Kapasitas lentur penampang dengan memperhitungkan tulangan non prategang dapat dihitung sebagai berikut.

a. Besaran gaya

Nilai *Compression concrete* (C_c)

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a_{cc}$$

Dimana,

Kuat tekan beton (f'_c) = 80 MPa

Luas blok tekan (a_{cc}) = 313621,52 mm²

Sehingga,

$$C_c = 0,85 \cdot f'_c \cdot a_{cc}$$

$$C_c = 0,85 \cdot 80 \cdot 313621,52$$

$$C_c = 21326263,71$$

Nilai C_s

$$f_{cs} = f_y$$

$$C_s = A_s' \cdot f_{cs}$$

Dimana,

Luas tampang tulangan atas (A_s') = 1592,787 mm²

Tegangan leleh baja tulangan (f_y) = 420 MPa

Sehingga,

$$C_s = A_s' \cdot f_{cs}$$

$$C_s = 1592,787 \cdot 420$$

$$C_s = 668970,73$$

Gaya tarik strand (T)

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

$$T = 13300 \cdot 1603,478$$

$$T = 21326263,711 \text{ N}$$

$$T = 21326,263 \text{ kN}$$

Gaya tarik tulangan nonprategang (Ts_2)

$$f_{ts} = f_y$$

$$Ts_2 = A_s \cdot f_{ts}$$

Dimana,

$$\text{Luas tampang tulangan atas (} A_s \text{)} = 1592,787 \text{ mm}^2$$

$$\text{Tegangan leleh baja tulangan (} f_{ts} \text{)} = 420 \text{ MPa}$$

Sehingga,

$$Ts_2 = A_s \cdot f_{ts}$$

$$Ts_2 = 1592,787 \cdot 420$$

$$Ts_2 = 668970,73$$

b. Panjang lengan terhadap garis netral

Lengan Cc

$$y_t - 0,5 \cdot a$$

$$1,1096 - 0,5 \cdot 0,192 = 1,0135 \text{ m}$$

Lengan Cs

$$y_t - sb - 0,5D$$

$$1,1096 - 0,05 - 0,5 \cdot 0,013 = 1,1038 \text{ m}$$

Lengan T

$$d_p - y_t$$

$$2,046 - 1,1096 = 0,9364 \text{ m}$$

Lengan Ts2

$$d - y_t$$

$$2,057 - 1,1096 = 0,9475 \text{ m}$$

Untuk mencari total kapasitas lentur penampang maka terlebih dulu harus dicari jumlah dari momen yang terjadi pada penampang, dimana momen yaitu gaya yang terjadi dikalikan dengan panjang lengan terhadap garis netral. Gaya dan panjang lengan yang terdapat pada gelagar dapat dilihat seperti pada gambar 5.30 diatas. pada Perhitungan total kapasitas lentur dengan memperhitungkan tulangan non prategang dapat dilihat seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. 28 Rekapitulasi Perhitungan Kapasitas Lentur

Gaya	Besaran gaya (kN)	Lengan (m)	Momen (kNm)
CC	21326,263	1,013	21616
Cs	668,970	1,103	738,443
T	21326,263	0,936	31801,72
Ts2	668,97	0,947	633,865
Jumlah			54790,05

5.2.8 Kapasitas Geser Penampang

Kapasitas geser penampang dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini.

$$V_c = \left(0,05 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_{cg}} + 4,8 \cdot \frac{V_u \cdot d_p}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d$$

Berikut langkah perhitungan kapasitas geser penampang

1. Momen ultimit (M_u)

$$M_u = 1,2 \cdot (M_{MS_G} + M_{MS_D}) + 1,3 \cdot (M_{MS_S}) + 2 \cdot (M_{MA_B} + M_{MA_A})$$

Dimana,

$$\text{Momen akibat beban gelagar } (M_{MS_G}) = 17666,08 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban diafragma } (M_{MS_D}) = 153,9 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban pelat } (M_{MS_S}) = 4332 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban air } (M_{MA_W}) = 566,048 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban aspal } (M_{MA_A}) = 1270,72 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban hidup } (M_{LL}) = 11540 \text{ kNm}$$

Sehingga,

$$M_u = 1,2 \cdot (M_{MS_G} + M_{MS_D}) + 1,3 \cdot (M_{MS_S}) + 2 \cdot (M_{MA_W} + M_{MA_A}) + 1,8 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 1,2 \cdot (17666,08 + 153,9) + 1,3 \cdot (4332) + 2 \cdot (566,048 + 1270,72) + 1,8 \cdot (11540)$$

$$M_u = 51462,189 \text{ kNm}$$

2. Beban ultimit (W_u)

$$W_u = \frac{M_u \cdot 8}{L^2}$$

$$W_u = \frac{56227,38 \cdot 8}{60,8^2}$$

$$W_u = 121,68 \text{ kN/m}$$

3. Gaya geser ultimit (V_u)

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot W_u \cdot L$$

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot 3699,17 \cdot 60,8$$

$$V_u = 3699,17 \text{ kN}$$

4. Kapasitas geser penampang (V_c)

$$V_c = \left(0,05 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_{cg}} + 4,8 \cdot \frac{V_u \cdot d_p}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d$$

Dimana,

$$\text{Lebar penampang } (b_w) = 1,2 \text{ m}$$

$$\text{Kedalaman tulangan prategang } (d_p) = 2,046 \text{ m}$$

$$\text{Kedalaman rata-rata } \textit{strand} \text{ dan tulangan nonprategang } (d) = 1,962 \text{ m}$$

$$\text{Kuat tekan beton } (f'_{cg}) = 80 \text{ MPa}$$

Sehingga,

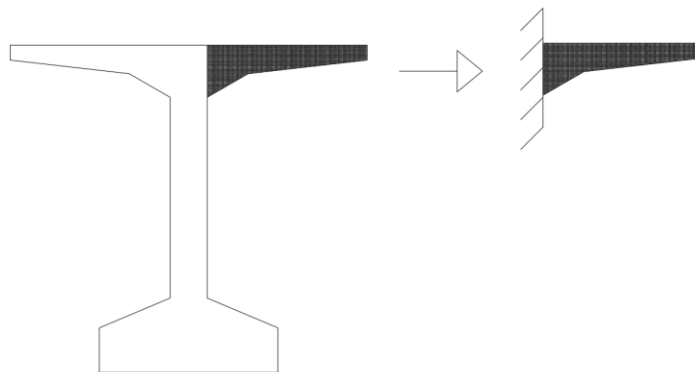
$$V_c = \left(0,05 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_{cg}} + 4,8 \cdot \frac{V_u \cdot d_p}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d$$

$$V_c = \left(0,05 \cdot 1 \cdot \sqrt{80000} + 4,8 \cdot \frac{3699,17 \cdot 2,046}{56227,38} \right) \cdot 1,2 \cdot 1,962$$

$$V_c = 2574,52 \text{ kN}$$

5.2.9 Desain Penulangan pada Kantilever

Desain penulangan pada bagian sayap gelagar diasumsikan sebagai struktur jepit bebas, sehingga akan di analisis sebagai struktur jepit yang tumpuannya berada pada badan gelagar. Gambar struktur jepit pada sayap gelagar dapat diilustrasikan seperti gambar di bawah ini.

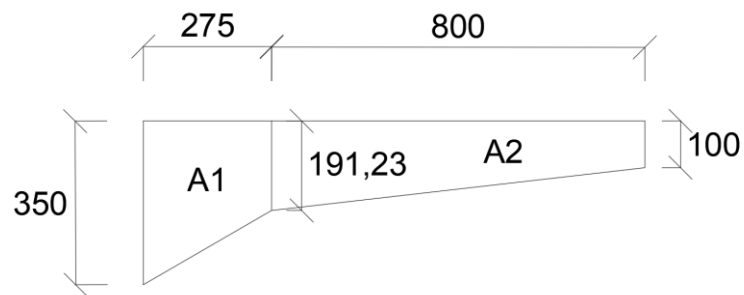


Gambar 5. 31 Ilustrasi Struktur Jepit pada Sayap Gelagar

1. Pembebanan

a. Berat sendiri penampang kantilever

Berikut adalah detail penampang kantilever pada gelagar dapat dilihat pada gambar 5.32 di bawah ini.



Gambar 5. 32 Penampang Kantilever

Berat sendiri penampang kantilever

$$W_g = A \cdot \gamma_c$$

Dimana,

$$\text{Luas penampang 1 (} A_1 \text{)} = 0,074419 \text{ m}^2$$

$$\text{Luas penampang 2 (} A_2 \text{)} = 0,116492 \text{ m}^2$$

$$\text{Berat jenis beton (} \gamma_c \text{)} = 25 \text{ kN/m}^3$$

Sehingga,

$$W_g = A \cdot \gamma_c$$

$$W_g = (A_1 + A_2) \cdot \gamma_c$$

$$W_g = (0,074419 + 0,116492) \cdot 25$$

$$W_g = 4,772 \text{ kN/m}$$

Berat pelat lantai (W_s)

$$W_s = t_s \cdot L \cdot \gamma_c$$

Dimana,

$$\text{Panjang kantilever (} L \text{)} = 1,075 \text{ m}$$

$$\text{Tebal pelat (} t_s \text{)} = 0,15 \text{ m}$$

$$\text{Berat jenis beton (} \gamma_c \text{)} = 25 \text{ kN/m}^3$$

Sehingga,

$$W_s = t_s \cdot L \cdot \gamma_c$$

$$W_s = 0,15 \cdot 1,075 \cdot 25$$

$$W_s = 4,03125 \text{ kN/m}$$

Berat aspal (W_a)

$$W_a = t_a \cdot L \cdot \gamma_c$$

Dimana,

$$\text{Tebal aspal } (t_a) = 0,05 \text{ m}$$

$$\text{Panjang kantilever } (L) = 1,075 \text{ m}$$

$$\text{Berat jenis beton } (\gamma_c) = 25 \text{ kN/m}^3$$

Sehingga,

$$W_a = t_a \cdot L \cdot \gamma_c$$

$$W_a = 0,05 \cdot 1,075 \cdot 25$$

$$W_a = 1,343 \text{ kN/m}$$

Beban hidup truk (P)

$$P = P_{truk} \cdot (1 + FBD)$$

Dimana,

$$\text{Beban satu roda truk } (P_{truk}) = 112,5 \text{ kN}$$

$$\text{Faktor beban dinamis (FBD)} = 0,3$$

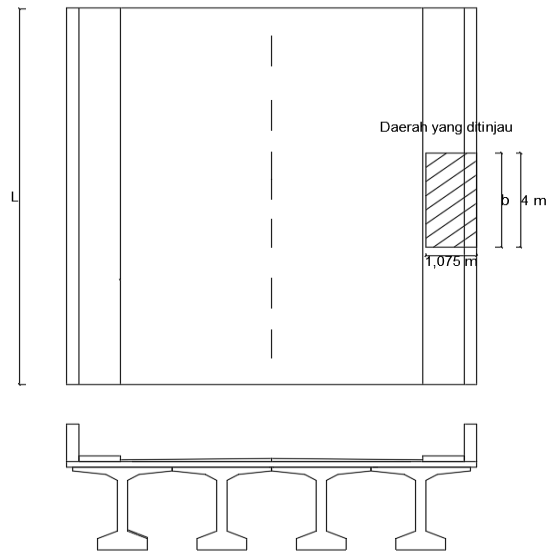
Sehingga,

$$P = P_{truk} \cdot (1 + FBD)$$

$$P = 112,5 \cdot (1 + 0,3)$$

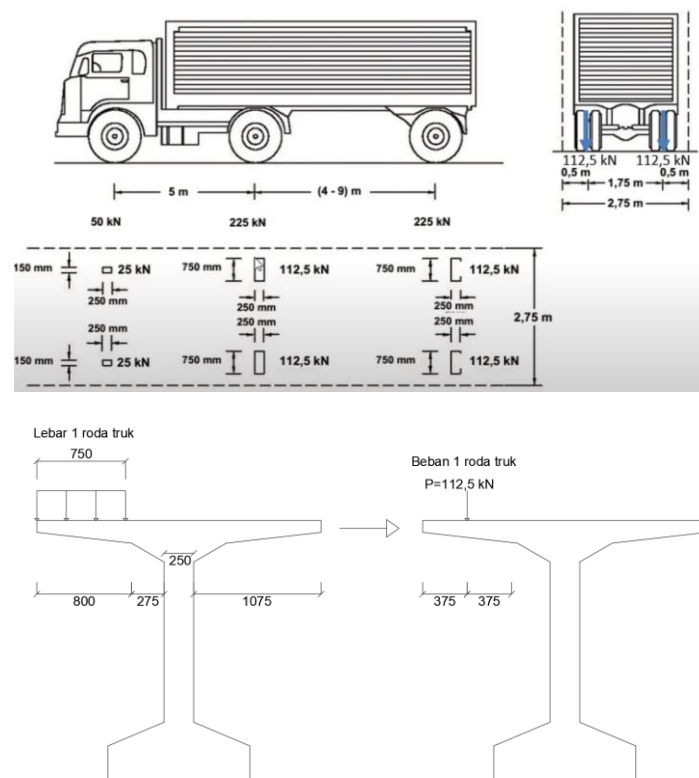
$$P = 146,25 \text{ kN}$$

Ilustrasi penempatan pembebanan roda truk diasumsikan bekerja pada titik ter ekstrim, yang mana kondisi ini terjadi ketika letak roda truk berada pada ujung sayap gelagar. truk memiliki lebar 1,75 m sedangkan sayap gelagar memiliki lebar 1,075 m, maka hanya satu sisi roda saja yang dihitung sebagai beban roda truk pada sayap gelagar, dan beban ini di asumsikan menjadi pembebanan beban titik. Berikut gambar daerah dan pembebanan pelat kantilever yang ditinjau seperti yang digambarkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 33 Denah Daerah Pelat Kantilver yang Ditinjau

Luasan daerah pelat kantilver yang ditinjau memiliki panjang 4 m yaitu jarak terpendek antar gandar pada truk, dan lebar 1,075 m yang merupakan panjang sayap gelagar yang bersifat jepit bebas.



Gambar 5. 34 Penempatan Beban Roda Truk

2. Perhitungan Gaya Dalam

Berdasarkan analisis program pada sap2000 maka didapatkan gaya dalam akibat masing-masing beban yang bekerja yaitu:

- a. Gaya dalam akibat berat kantilever gelagar dan pelat

$$\text{Momen } (M_{MS}) = 3,91 \text{ kNm}$$

$$\text{Geser } (V_{MS}) = 7,09 \text{ kN}$$

- b. Gaya dalam akibat beban mati tambahan

$$\text{Momen } (M_{MA}) = 1,49 \text{ kNm}$$

$$\text{Geser } (V_{MA}) = 2,77 \text{ kN}$$

- c. Gaya dalam akibat beban truk

$$\text{Momen } (M_{TT}) = 102,38 \text{ kNm}$$

$$\text{Geser } (V_{TT}) = 146,25 \text{ kN}$$

3. Kombinasi Pembebanan

- a. Momen ultimate

$$M_U = 1,3M_{MS} + 2M_{MA} + 1,8M_{TT}$$

$$M_U = 1,3 \cdot 3,91 + 2 \cdot 1,49 + 1,8 \cdot 102,38$$

$$M_U = 192,35 \text{ kNm}$$

- b. Geser ultimate

$$A_{s_used} = 2234 \text{ mm}^2 \geq A_{s_req} = 2145,71 \text{ mm}^2$$

$$V_U = 1,3 \cdot 7,09 + 2 \cdot 2,77 + 1,8 \cdot 146,25$$

$$V_U = 278,01 \text{ kN}$$

4. Desain Tulangan Kantilever

Pada desain tulangan kantilever diasumsikan tulangan geser menggunakan diameter 13 mm dan untuk tulangan lentur diasumsikan menggunakan tulangan diameter 16 mm.

Tinggi efektif (d_e)

$$d_e = h_b - d_c - D_s - \frac{D}{2}$$

Dimana,

$$\text{Tinggi pelat gelagar } (h_b) = 350 \text{ mm}$$

$$\text{Tebal selimut beton } (d_c) = 50 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan geser } (D_s) = 13 \text{ mm}$$

$$\text{Diameter tulangan lentur } (D) = 16 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$d_e = h_b - d_c - D_s - \frac{D}{2}$$

$$d_e = 350 - 50 - 13 - \frac{16}{2}$$

$$d_e = 279 \text{ mm}$$

Luas tulangan perlu (A_{s_req})

$$A_{s_req} = \frac{M_U}{\Phi f \cdot f_y \cdot 0,85 \cdot d_e}$$

Dimana,

$$\text{Momen ultimate } (M_U) = 192,35 \text{ kNm}$$

$$\text{Faktor reduksi kekuatan } (\Phi f) = 0,9$$

$$\text{Tegangan leleh baja } (f_y) = 420 \text{ MPa}$$

$$\text{Tinggi efektif } (d_e) = 279 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$A_{s_req} = \frac{M_U}{\Phi f \cdot f_y \cdot 0,85 \cdot d_e}$$

$$A_{s_req} = \frac{192,35}{0,9 \cdot 420 \cdot 0,85 \cdot 279}$$

$$A_{s_req} = 2145,71 \text{ mm}^2$$

Luas satu tulangan lentur (A_s)

$$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2$$

$$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2$$

$$A_s = 201,06 \text{ mm}^2$$

Jarak tulangan (s)

$$s = \frac{b}{A_{s_req}} \cdot A_s$$

Dimana,

$$\text{Lebar efektif } (b) = 1000 \text{ mm}$$

$$\text{Luas tulangan perlu } (A_{s_req}) = 2145,71 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas satu tulangan lentur } (A_s) = 201,06 \text{ mm}^2$$

Sehingga,

$$s = \frac{b}{A_{s_req}} \cdot A_s$$

$$s = \frac{1000}{2145,71} \cdot 201,06$$

$$s = 93,70 \text{ mm}$$

Maka, digunakan jarak tulangan = 90 mm

Total luas tulangan yang digunakan (A_{s_used})

$$A_{s_used} = \frac{b}{s_{use}} \cdot A_s$$

Dimana,

$$\text{Lebar efektif } (b) = 1000 \text{ mm}$$

$$\text{Jarak tulangan pakai } (s_{use}) = 90 \text{ mm}$$

$$\text{Luas satu tulangan lentur } (A_s) = 201,06 \text{ mm}^2$$

Sehingga,

$$A_{s_used} = \frac{b}{s_{use}} \cdot A_s$$

$$A_{s_used} = \frac{1000}{90} \cdot 201,06$$

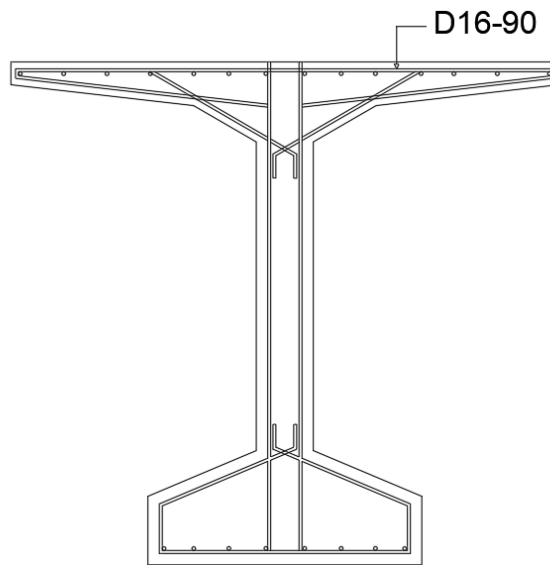
$$A_{s_used} = 2234,02 \text{ mm}^2$$

Periksa $A_{s_used} \geq A_{s_req}$

$$A_{s_used} = 2234 \text{ mm}^2 \geq A_{s_req} = 2145,71 \text{ mm}^2$$

Karenan nilai $A_{s_used} \geq A_{s_req}$ maka hasilnya memenuhi syarat. Jadi tulangan yang digunakan pada kantilever yaitu D16-90.

Gambar penulangan pada kantilever dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



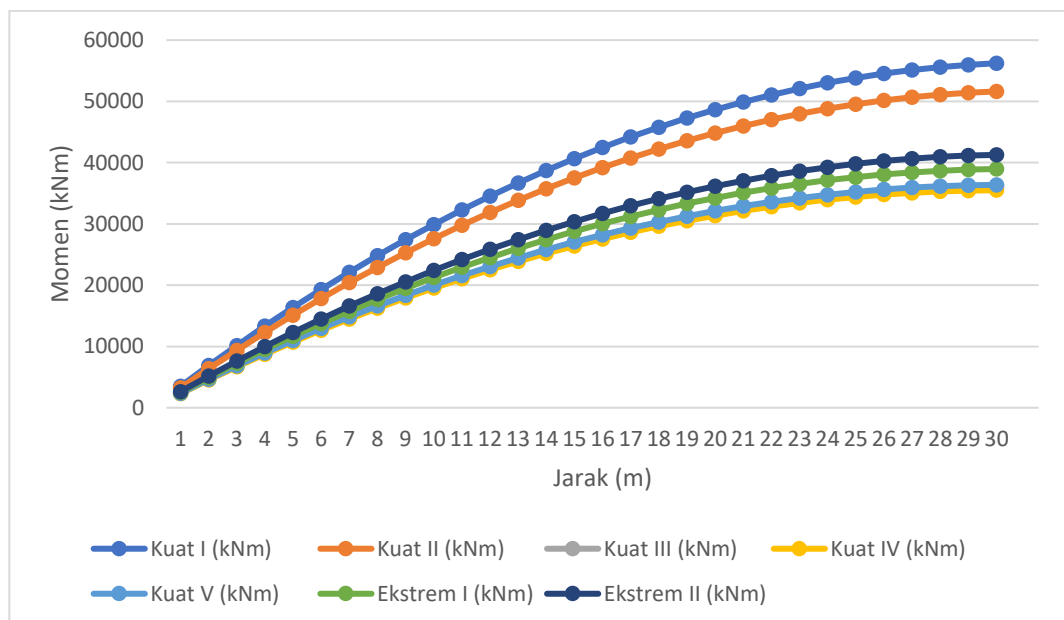
Gambar 5. 35 Penulangan pada Kantilever

5.3 Pembahasan

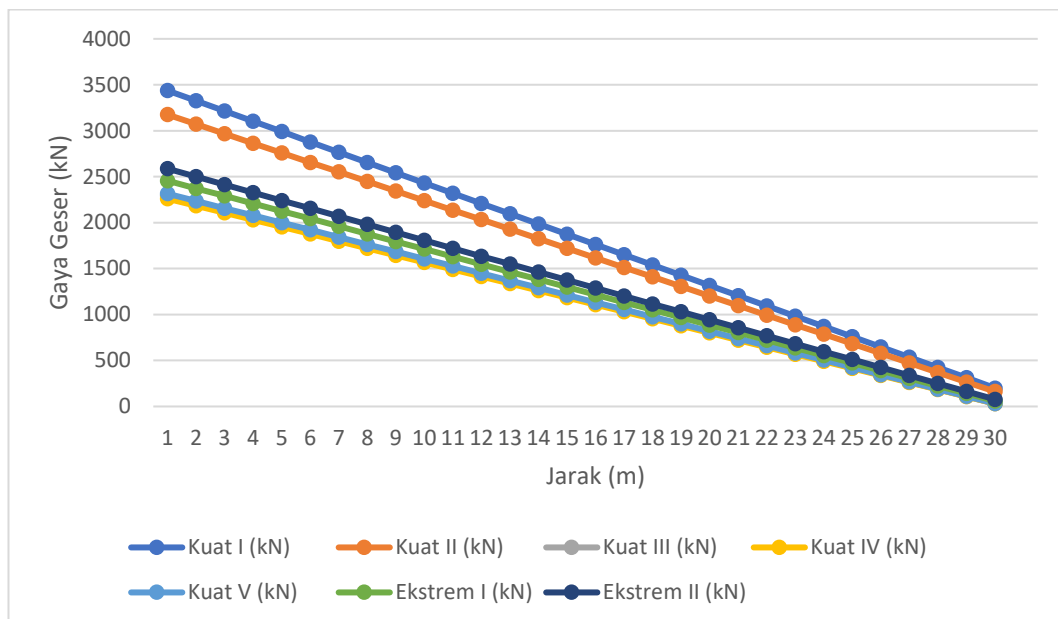
Pada perhitungan perencanaan struktur atas jembatan Tukad Yeh Unda didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut.

1. Momen dan Gaya Geser pada Gelagar

Berdasarkan pada perhitungan pada subbab 5.2.2 didapatkan hasil kombinasi pembebanan yang terjadi pada gelagar, dengan hasil kombinasi pembebanan “Kuat I” menjadi kombinasi yang menghasilkan pembebanan terbesar dan momen yang terjadi pada daerah lapangan memiliki momen yang lebih besar dibanding di daerah tumpuan, seperti pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 36 Diagram Momen Yang Terjadi Akibat Beban pada Gelagar

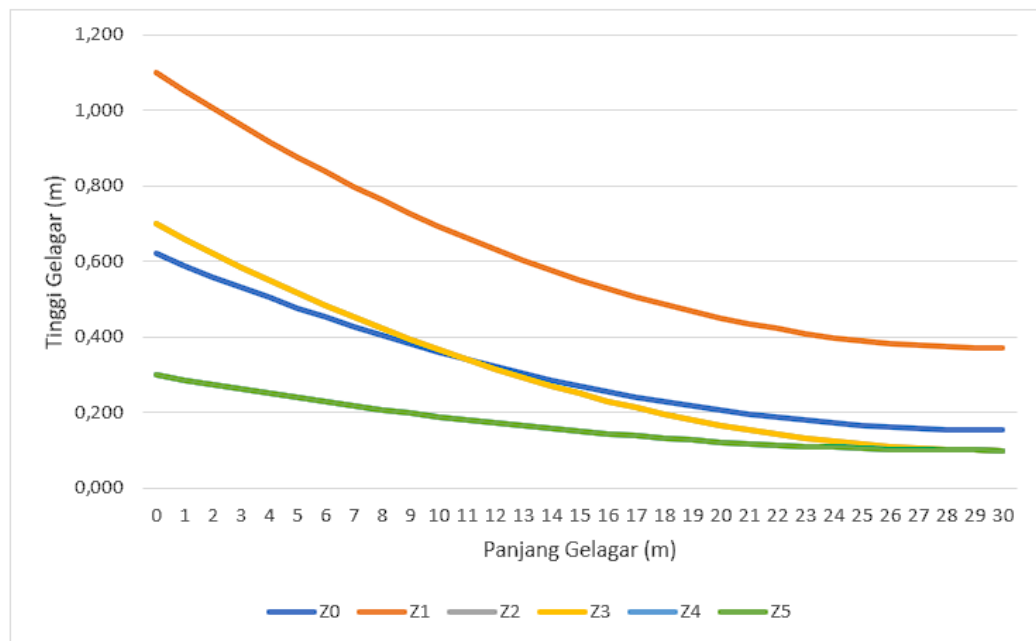


Gambar 5. 37 Diagram Gaya Geser Akibat Beban pada Gelagar

Berdasarkan gambar diatas dihasilkan diagram geser yang terjadi pada gelagar akibat beban, Yang menunjukkan nilai gaya geser yang terjadi di daerah dekat tumpuan memiliki gaya geser yang lebih besar dibandingkan dengan gaya geser yang terjadi pada daerah lapangan.

2. Kebutuhan tendon

Berdasarkan subbab 5.2.3 dihasilkan jumlah tendon yang diperlukan pada PC Bulbtee girder adalah sebanyak 5 tendon dengan jumlah 95 *strand*. Letak posisi tendon pada gelagar prategang. Berdasarkan gambar dibawah ini menggambarkan tata letak tendon pada setengah panjang gelagar. Terdapat beberapa tendon yang digambarkan dengan garis yang memiliki simbol Z1, Z2, Z3, Z4, dan Z5 sebagai tendon utama, dan Z0 sebagai garis netral dari tendon. Adapun posisi tendon 2 dan 3 yang digambarkan dengan Z2 dan Z3 hanya tergambar oleh satu garis yaitu garis kuning (Z3) karena posisi kedua tendon sejajar jika dilihat dari tampak samping, begitupun tendon 4 dan 5 yang digambarkan dengan Z4 dan Z5 hanya tergambar dengan tendon warna hijau (Z5).dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 5. 38 Tata Letak Tendon pada Gelagar

3. Kehilangan Prategang

Kehilangan prategang pada PC Bulbtee girder terbagi menjadi 2 fase. Yaitu kehilangan prategang jangka pendek dan jangka panjang. Kehilangan prategang jangka pendek meliputi kehilangan prategang akibat gesekan (friksi), akibat pergeseran ankur, dan akibat perpendekan elastis. Sedangkan kehilangan prategang jangka panjang meliputi kehilangan prategang akibat susut pada gelagar, akibat relaksasi tendon, dan akibat rangkai pada gelagar.

Rekapitulasi hasil kehilangan prategang akibat kedua fase tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

Rekapitulasi hasil kehilangan prategang akibat kedua fase tersebut dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 29 Rekapitulasi Perhitungan Kehilangan Prategang

Fase Kehilangan Prategang	Kehilangan Prategang	Notasi	Nilai	Satuan
Saat Transfer (jangka pendek)	Akibat gesekan	Δ_{fpF}	44,041	Mpa
	Akibat pergeseran ankur	Δ_{fpA}	17,898	Mpa
	Akibat perpendekan elastis	Δ_{fpES}	63,847	Mpa
Saat transfer hingga final (jangka panjang)	Akibat susut pada gelagar	Δ_{fpSR}	62,889	Mpa
	Akibat relaksasi tendon	Δ_{fpR1}	8	Mpa
	Akibat rangkai pada gelagar	Δ_{fpCR}	67,965	Mpa
Presentase kehilangan prategang		$Losses_final$	14,228	%

4. Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser

Kapasitas lentur dan Geser yang terjadi pada gelagat didapatkan hasil seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 5. 30 Hasil Perhitungan Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser

Data	Notasi	Nilai	Satuan
Kapasitas lentur	M_n	54790,047	kNm
Kapasitas Geser	V_c	2574,52	kN

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari perhitungan pada PC Bulbtee girder didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Jumlah tendon yang dibutuhkan oleh PC Bulbtee girder sebanyak 5 tendon dengan total 95 *strand*
2. Kehilangan prategang akhir yang terjadi pada PC Bulbtee girder sebesar 14,228%
3. Penulangan pada pelat kantilever pada gelagar digunakan tulangan D16-90mm

6.2 Saran

Adapun saran dalam penelitian ini agar penelitian selanjutnya lebih detail dan kompleks yaitu:

1. Penelitian ini hanya berfokus pada perhitungan struktur atas jembatan saja, selanjutnya bisa dilakukan perhitungan pada struktur bawah jembatan agar didapatkan hasil yang lebih detail.
2. Perlu dilakukan analisis pelaksanaan saat konstruksi, karena pada penelitian ini hanya berfokus pada perhitungan desain gelagar saja.

DAFTAR PUSTAKA

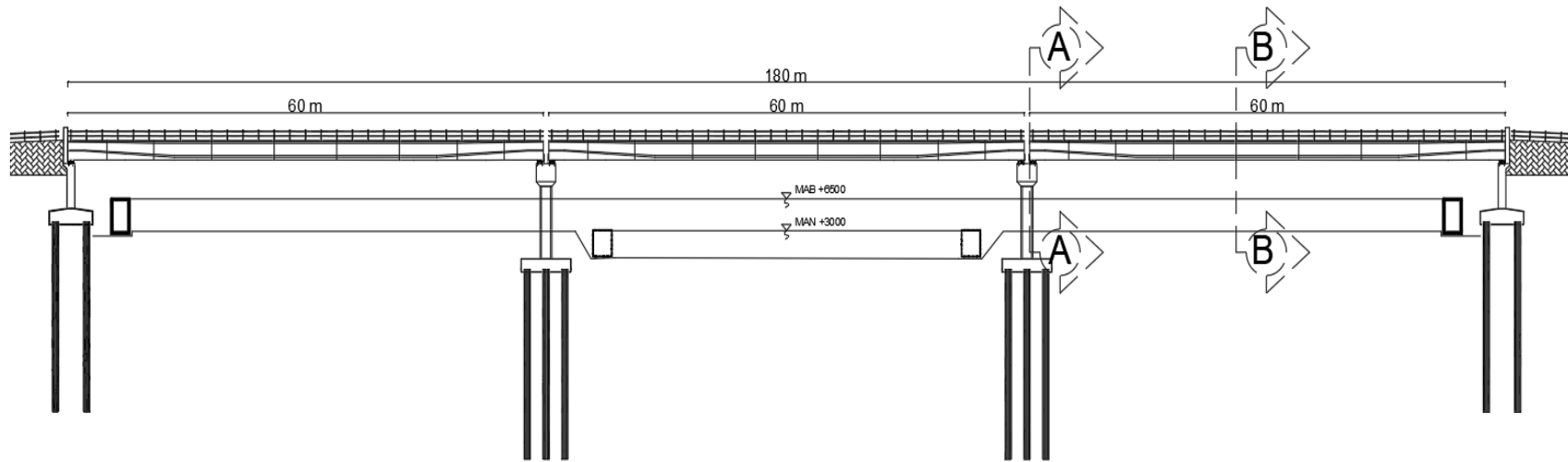
- AASHTO. 2017, *AAHSTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington D.C: AASHTO
- Annur, D. F., & Tarigan, J. (2013). Perencanaan Precast Concrete I Girder Pada Jembatan Prestressed Post-Tension Dengan Bantuan Program Microsoft Office Excel. *Jurnal Teknik Sipil Universitas Sumatera UTara*, 1–8.
- Badan Standarisasi Nasional. 2004. *Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan*. Jakarta: BSN
- Badan Standarisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- Badan Standarisasi Nasional. 2016. *Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: BSN.
- Batubara, S., & Simatupang, L. (2018). Perencanaan Jembatan Beton Prategang Dengan Bentang 24 Meter Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI). *Jurnal Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil (JRKMS)*, 1(2), 45–61. <https://doi.org/10.54367/jrkms.v1i2.280>
- Best, R., & de Valence, G. (2007). Design and construction. *Design and Construction*, 1–504. <https://doi.org/10.4324/9780080491080>
- Direktorat Jendral Bina Marga. 2021. *Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan*. Penerbit Bina Marga. Jakarta
- Kurniati, Rezki, J. (2019). Seminar Nasional Industri dan Teknologi (SNIT), Politeknik Negeri Bengkalis. *Perancangan Aplikasi Antrian Pasien Di Rumah Sakit Menggunakan Metode Fast*, 2016(Lcm), 270–276.

Leo, E., & M.H., N. A. (2017). Kajian Efisiensi Bulb-Tee Shape and Half Slab Girder Dengan Blister Tunggal Terhadap Pc-I Girder. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran Dan Ilmu Kesehatan*, 1(1), 309–317.
<https://doi.org/10.24912/jmstkik.v1i1.444>

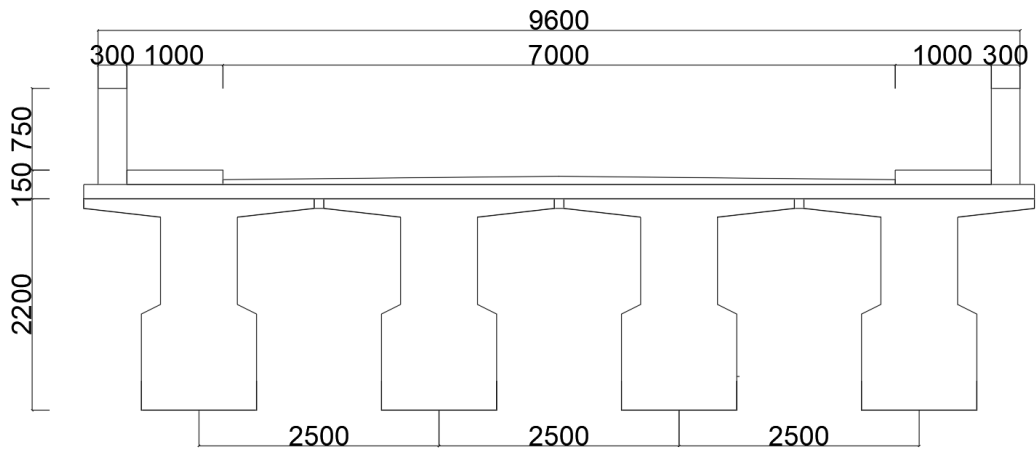
Yail J. Kim, T. S. (2020). *bulb-tee girders in Colorado*. 3, 53–63.

LAMPIRAN

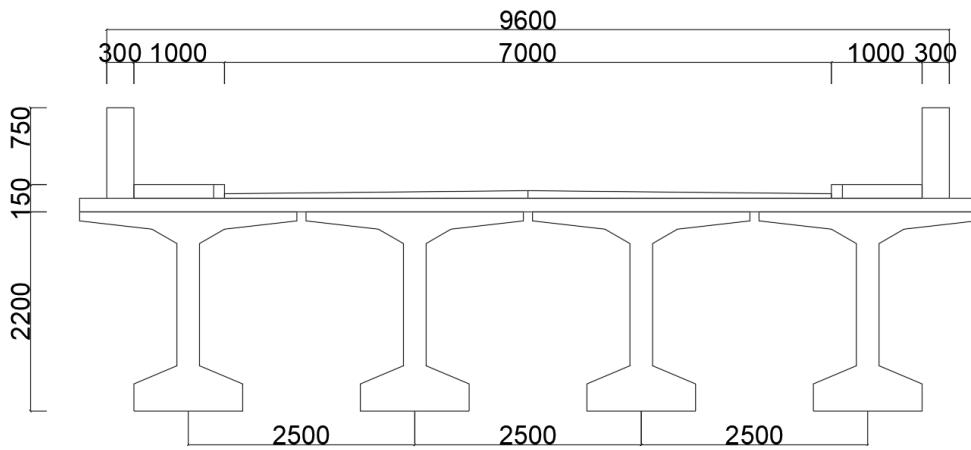
Lampiran 1 Gambar Desain Jembatan Tukad Yeh Unda



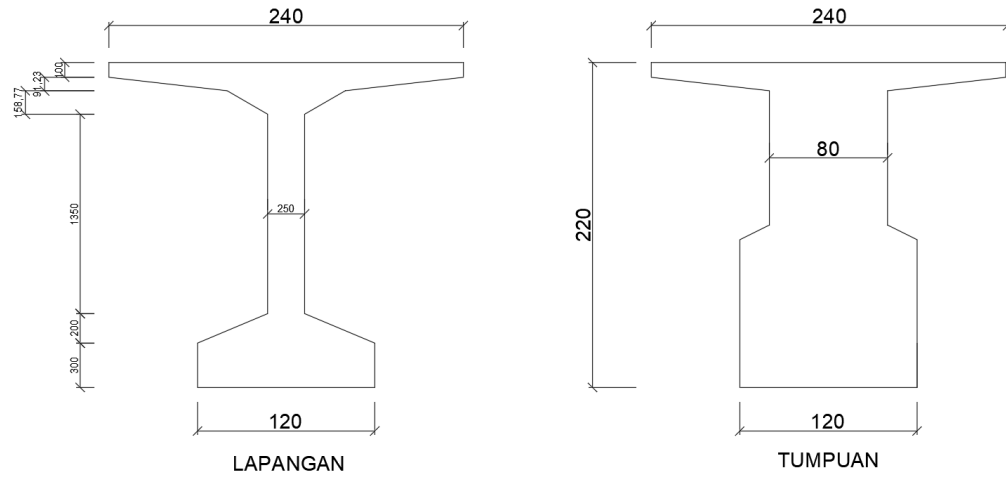
Gambar L-1. 1 *Long Section* Jembatan Tukad Yeh Unda



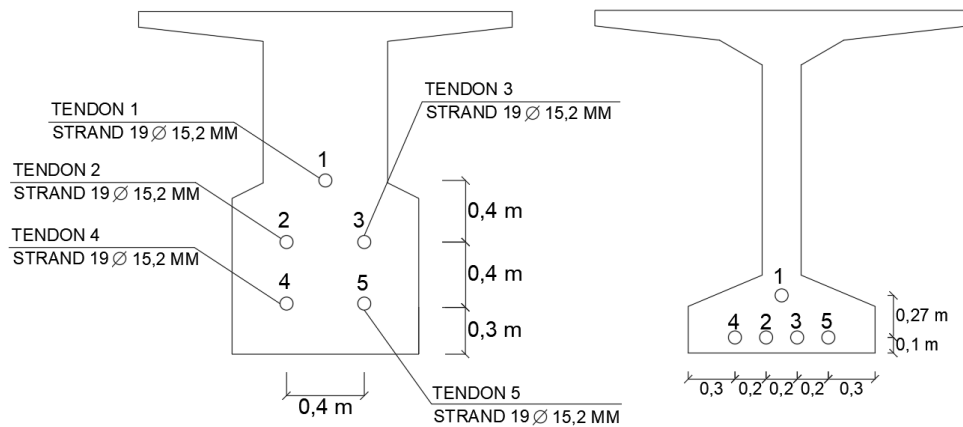
Gambar L-1. 2 Potongan A-A Jembatan Tukad Yeh Unda



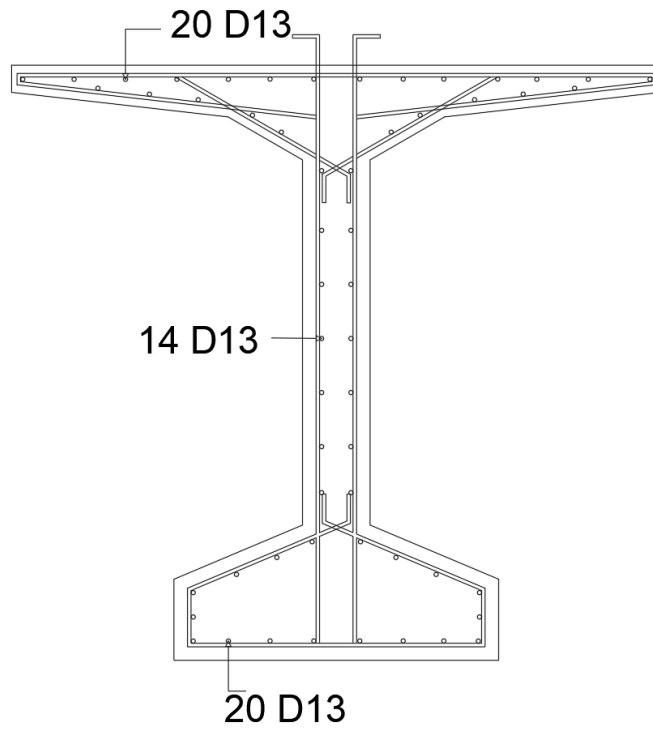
Gambar L-1. 3 Potongan B-B Jembatan Tukad Yeh Unda



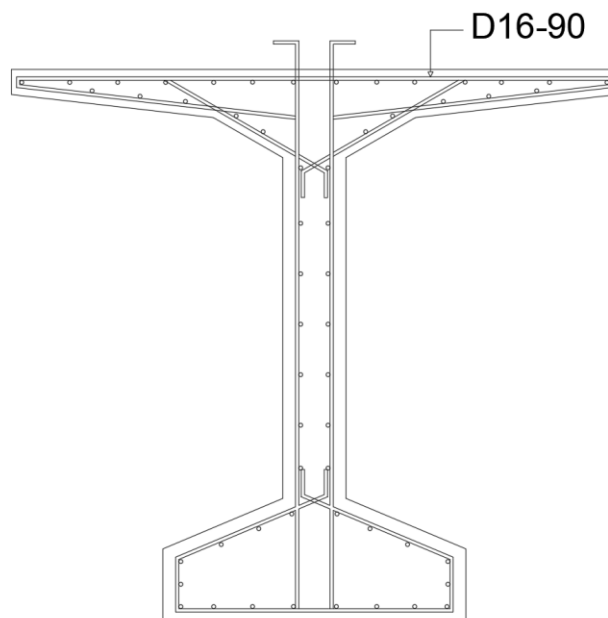
Gambar L-1. 4 Penampang PC Bulb-Tee girder pada Bagian Tumpuan dan Lapangan



Gambar L-1. 5 Letak Tendon pada Penampang di Tumpuan dan Lapangan



Gambar L-1. 6 Penulangan Lentur Nonprategang pada Gelagar



Gambar L-1. 7 Penulangan Pelat Kantilever pada Gelagar