TUGAS AKHIR

PERENCANAAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN PERNING KLOJI DI MOJOKERTO MENGGUNAKAN *PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER* (*REDESIGN OF THE UPPER STRUCTURE OF THE PERNING KLOJI BRIDGE IN MOJOKERTO USING PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER*)

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

RIFDATUN NABILAH
20511243

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

2025

LEMBAR PENGESAHAN

PERENCANAAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN PERNING KLOJI DI MOJOKERTO MENGGUNAKAN *PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER* (*REDISGN OF THE UPPER STRUCTURE OF THE PERNING KLOJI BRIDGE IN MOJOKERTO USING PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER*)

Disusun oleh

Rifdatun Nabilah
20511243

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

Diuji pada tanggal 6 November 2025

Oleh Dewan Penguji:

Pembimbing	Penguji I	Penguji II
Ir. Suharyatma, M.T.	Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T.	Malik Mushthofa, S.T., M.Eng
NIK : 865110201	NIK : 18511304	NIK : 18511302

Mengesahkan,
Ketua Program Studi Teknik Sipil

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
YOGYAKARTA

Ir. Yunalia Muntafi S.T., M.T., Ph.D.
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,6 November 2025

Yang membuat pernyataan



Rifdatun Nabilah

20511243

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat Rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Perencanaan Struktur Atas Jembatan Perning Kloji di Mojokerto Mengguankan *Prestressed Concrete I Girder*". Tugas Akhir ini disusun dan diajukan kepada Universitas Islam Indonesia untuk memenuhi persyaratan akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis. Namun berkat saran, kritik, bimbingan, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, Alamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Ibu Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.
2. Bapak Ir. Suharyatma, M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir yang telah memberikan banyak arahan, bimbingan, dan dukungan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Bapak Anggit Mas Arifudin, S.T., M.T. dan Bapak Malik Mushthofa, S.T., M.Eng selaku Dosen Penguji yang telah memberikan bimbingan serta masukan kepada penulis.
4. Orang tua penulis, Almarhumah Ibu Athiyatul Maula, Bapak Sihab Alwi, dan Ibu Robiatul Adawiyah, yang selalu mendoakan, mendukung, serta selalu memberi kepercayaan penuh kepada penulis.
5. Saudara dan saudari penulis, Azka zulfiah, S.Pd., Nafisatul Hifdyah, S.Ak., Dian Wahyu Bawono, S.T., Helmi Fathoni, S.T., Viska Hana Hapsari,

S.I.Kom., Lubnayya Nabigha, dan Rhadiyya Tsabita. Serta keponakan penulis, Latisha Zahwa, Albifardzan Asyamie, Elfatih Zafran, dan Evelyn Fitr, yang selalu memberi semangat, memberi motivasi, serta selalu mendukung dan menghibur penulis.

6. Teman teman penulis, Saffana, Alifa, Asma, Salwa, Sarah, Maji, Eci, serta seluruh teman yang tidak bisa disebutkan satu per satu, yang selalu memeberikan dukukangan dan motivasi kepada penulis.
7. *Last but not least, i wanna thank me. I wanna thank me for believing in me, i wanna thank me for doing all this hard work, i wanna thank me for having no days off, i wanna thank me for never quitting, i wanna thank me for always being a giver and tryna give more than i recieve, i wanna thank me for tryna do more right than wrong, i wanna thank me for just being me at all times.*

Selanjutnya, penulis berharap agar Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 6 November 2025

Rifadatun Nabilah
20511243

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR i

LEMBAR PENGESAHAN ii

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI vi

DAFTAR TABEL xi

DAFTAR GAMBAR xiii

DAFTAR LAMPIRAN xvi

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xvii

ABSTRAK xx

ABSTRACT xxi

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Rumusan Masalah 2

1.3 Tujuan Penelitian 2

1.4 Manfaat Penelitian 3

1.5 Batasan Penelitian 3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5

2.1 Tinjauan Umum 5

2.2 Penelitian Terdahulu 5

2.2.1 Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan Sungai Mesim Menggunakan PCI *Girder* Berdasarkan Pembebanan SNI 1725-2016 5
2.2.2 Perencanaan Ulang Jembatan Bae-Basito (Karangsambung) dengan PCI Girder. 7
2.2.3 Perencanaan Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo Menggunakan PCI *Girder* 8
2.3 Keabsahan Penelitian 9
BAB III LANDASAN TEORI 12
3.1 Pengertian Jembatan 12
3.2 Tipe Jembatan 12
3.3 Komponen pada Jembatan 13
3.3.1 Bangunan Atas Jembatan 13
3.3.2 Bangunan Bawah Jembatan 14
3.3.3 Jalan Pedekat (*oprit*) 14
3.3.4 Bangunan Pengaman 15
3.4 Jembatan Gelagar 15
3.5 Balok Pracetak 15
3.6 Konsep Balok Prategang 16
3.6.1 Metode Prategang 17
3.6.2 Tahap Pembebanan Prategang 19
3.7 Kondisi Jembatan Eksisting 20
3.7.1 Eksisting Jembatan 20
3.7.2 Data Tanah 21
3.8 Pembebanan 21
3.8.1 Beban Primer 22
3.8.2 Beban Lajur 24

3.8.3 Beban Rem (TB) 28
3.8.4 Beban Pejalan Kaki (TP) 28
3.8.5 Gaya Akibat Temperatur Seragam (EU_n) 29
3.8.6 Tekanan Angin pada Struktur (EWS) 30
3.8.7 Beban Gempa 33
3.8.8 Kombinasi Beban Rencana 34
3.9 Perencanaan Elemen – Elemen Struktur Atas Jembatan 35
3.9.1 Pelat lantai 35
3.9.2 Balok Girder 36
3.9.3 Estimasi Gaya Prategang Serta Luas Tendon yang dibutuhkan 36
3.9.4 Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang 39
3.9.5 Kontrol Tegangan Prategang 40
3.9.6 Kapasitas Lentur Penampang 42
3.9.7 Kapasitas Geser Penampang 44
3.9.8 Desain Tulangan *Shear Connector* 46
3.9.9 Desain Tulangan Bursting 46
3.9.10 Kontrol Defleksi Balok Prategang 48
3.10 Perencanaan Penulangan Jembatan 49
3.10.1 Penulangan lentur 49
3.10.2 Penulangan geser 51
BAB IV METODELOGI PENELITIAN 53
4.1 Objek Perencanaan 53
4.2 Perumusan Rencana Jembatan 53
4.2.1 Bentang Jembatan 54
4.2.2 Lebar Jembatan 54

4.2.3 Rencana Penampang PCI Girder 55
4.3 Metode Perencanaan 57
4.3.1 Studi Literatur 57
4.3.2 Pengumpulan Data 58
4.3.3 Analisis Perencanaan Struktr Atas Jembatan 58
4.3.4 Penyususnan Laporan 59
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN 63
5.1 Tinjauan Umum 63
5.1.1 Data Teknis Jembatan 63
5.1.2 Material 64
5.2 Perencanaan Pelat Jembatan 67
5.2.1 Pembebanan Pelat Jembatan 67
5.2.2 Permodelan SAP 2000 70
5.2.3 Penentuan Momen Ultimate (M_U) 74
5.2.4 Penulangan Pelat Jembatan 76
5.3 Perencanaan PCI-Girder Jembatan 82
5.3.1 Modulus Penampang PCI Girder 84
5.3.2 Analisis Pembebanan pada PCI-Girder 89
5.3.3 Analisis Kebutuhan Tendon 111
5.3.4 Perhitungan Kehilangan Prategang 121
5.3.5 Pemeriksaan Tegangan 146
5.3.6 Kapasitas Lentur Penampang 155
5.3.7 Penulangan Balok Prategang 157
5.3.8 Kapasitas Geser Penampang 159
5.3.9 Desain Tulangan *Shear Connector* 164

5.3.10 Kontrol Defleksi Balok Prategang 166
5.3.11 Desain Tulangan *Bursting* 169
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 174
6.1 Kesimpulan 174
6.2 Saran 175
DAFTAR PUSTAKA 176
LAMPIRAN 178

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dan Sekarang 10
Tabel 3. 1 Berat Isi dan Kerapatan Massa untuk Beban Mati 22
Tabel 3. 2 Faktor Beban untuk Berat Sendiri 23
Tabel 3. 3 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan 24
Tabel 3. 4 Faktor Beban untuk Beban Lajaur “D” 25
Tabel 3. 5 Faktor Beban untuk Beban “T” 27
Tabel 3. 6 Faktor Kepadatan Lajur 28
Tabel 3. 7 Temperatur Jembatan Rata – rata Nominal 29
Tabel 3. 8 Temperatur Jembatan Rata-rata Nominal 30
Tabel 3. 9 Nilai V0 dan Z0 untuk Berbagai Variasi Kondisi Permukaan Hulu 31
Tabel 3. 10 Tekanan Angin Dasar 32
Tabel 3. 11 Tekanan Angin Dasar PB untuk Berbagai Sudut Serang 32
Tabel 3. 12 Kombinasi Beban dan Faktor Beban 35
Tabel 4. 1 Spesifikasi PCI- Girder H-210 57
Tabel 5. 1 Berat Jenis Material 67
Tabel 5. 2 Rekaitulasi Momen 74
Tabel 5. 3 Momen Pakai 74
Tabel 5. 4 Kombinasi Penentuan Momen Ultimate 75
Tabel 5. 5 Modulus Penampang Gelagar Nonkomposit 85
Tabel 5. 6 Modulus Penampang Gelagar Komposit 87
Tabel 5. 7 Nilai Kecepatan Gesekan Angin (V0) Dan Panjang Gesekan (Z0) 98
Tabel 5. 8 Statis Momen Distribusi Gaya Angin 101
Tabel 5. 9 Rekapitulasi Perhitungan Berat Sendiri Gelagar (MS) 104
Tabel 5. 10 Rekapitulasi Perhitungan Beban Mati Tambahan Gelagar (MA) 104
Tabel 5. 11 Rekapitulasi Perhitungan Beban Lalu Lintas Gelagar (LL) 104
Tabel 5. 12 Rekapitulasi Perhitungan Beban Gempa 105

Tabel 5. 13 Rekapitulasi Pembebanan 105
Tabel 5. 14 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Maksimum 106
Tabel 5. 17 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Kuat I 107
Lanjutan Tabel 5. 17 Rekapitulasi Momen & Gaya Geser Kombinasi Kuat I 108
Tabel 5. 18 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan I 108
Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan I 109
Tabel 5. 19 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan III 110
Lanjutan Tabel 5. 19 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan III 111
Tabel 5. 20 Posisi Tendon Pada Tengah Bentang 114
Tabel 5. 21 Posisi Tendon Pada Ujung Bentang 116
Tabel 5. 22 Rekapitulasi Perhitungan Sudut Angkur 119
Tabel 5. 23 Hasil Posisi Trace Pada Tiap Tendon 119
Tabel 5. 24 Kehilangan Prategang Pada Gelagar Pascatarik 122
Tabel 5. 25 Inersia Gelagar Saat Transfer 123
Tabel 5. 26 Inersia Gelagar Nonkomposit Saat Final 125
Tabel 5. 27 Inersia Gelagar Komposit Saat Final 127
Tabel 5. 28 Rekapitulai Kehilangan Prategang Akibat Gesekan 130
Tabel 5. 29 Rekapitulasi Hasil Kehilangan Prategang Akibat Anchorge Set 132
Lanjutan Tabel 5. 29 Rekapitulasi Hasil Kehilangan Prategang Akibat Anchorge Set 133
Tabel 5. 30 Rekapitulasi Kehilangan Prategag Gelagar Pascatarik 143
Tabel 5. 31 Rekapitulasi Kehilangan Prategang Di Tengah Bentang 145
Tabel 5. 32 Rekapitulasi Tegangan Pada Saat Transfer 148
Tabel 5. 33 Rekapitulasi Tegangan Pada Saat Konstruksi 149
Tabel 5. 34 Rekapitulasi Tegangan Pada Saat Layan 153
Tabel 5. 35 Hasil Perhitungan Gaya Prategang Jacking Pada Tiap Tendon 170
Tabel 5. 36 Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Sengkang Arah Vertikal 172
Tabel 5. 37 Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Sengkang Arah Horizontal 172
Tabel 5. 38 Kesimpulan Sengkang Untuk Bursting force 172

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Beton Prategang Pratarik 17

Gambar 3. 2 Beton Prategang Pascatarik 18

Gambar 3. 6 Beban Lajur “D” 25

Gambar 3. 7 Faktor Beban Dinamis Untuk Beban T untuk Pembebanan Laju "D" 26

Gambar 3. 8 Pembebanan Truk “T” (500 kN) 27

Gambar 3. 9 Eksentrisitas Tendon 37

Gambar 4. 1 lokasi jembatan perning kloji 53

Gambar 4. 2 Potongan Memanjang 54

Gambar 4. 3 Penampang Melintang Rencana Jembatan 55

Gambar 4. 4 Katalog PCI Girder PT. Wijaya Karya Beton Tbk. 56

Gambar 4. 6 Diagram Alir Penelitian 62

Gambar 5. 1 Penampang Melintang Rencana Jembatan Perning Kloji 63

Gambar 5. 2 Penampang Trotoar dan Barrier 66

Gambar 5. 3 Penampang PCI-Girder H-210 66

Gambar 5. 4 Pembebanan Angin Kendaraan 69

Gambar 5. 5 Pemodelan Beban Mati Sendiri (Ws) 70

Gambar 5. 6 Bending Momen Diagram Akibat Beban Mati Sendiri (Ws) 71

Gambar 5. 7 Pemodelan Beban Trotoar (W_{tr}) 71

Gambar 5. 8 bending momen diagram akibat beban trotoar (W_{tr}) 71

Gambar 5. 9 Pemodelan Beban Barrier (W_{br}) 71

Gambar 5. 10 Bendig Momen Diagram Akibat Beban Barrier (W_{br}) 71

Gambar 5. 11 Pemodelan Beban Aspal Dan Air Hujan (Wa) 71

Gambar 5. 12 Bending Momen Diagram Akibat Aspal Dan Air Hujan (Wa) 72

Gambar 5. 13 Pemodelan Beban Truk Model-1 (PT-1) 72

Gambar 5. 14 Bending Momen Diagram Akibat Beban Truk Model-1 (PT-1) 72
Gambar 5. 15 Pemodelan Beban Truk Model-2 (PT-2) 72
Gambar 5. 16 Bending Momen Diagram Akibat Beban Truk Model-2 (PT-2) 72
Gambar 5. 17 Pemodelan Beban Angin Kendaraan (P_{EW}) 73
Gambar 5. 18 Bnding Momen Diagram Akibat Beban Angin Kendaraan (P_{EW}) 73
Gambar 5. 19 Pemodelan Beban Pejalan Kaki (W_{TP}) 73
Gambar 5. 20 Bending Momen Diagram Akibat Beban Pejalan Kaki (W_{TP}) 73
Gambar 5. 21 Bidang Kontak Truk Dengan Pelat Lantai 80
Gambar 5. 22 Punching Shear Pelat Lantai 80
Gambar 5. 23 Detail Tulangan Pelat Lantai 82
Gambar 5. 24 Penampang Melintang Jembatan 84
Gambar 5.25 Potongan Gelagar Nonkomposit 85
Gambar 5. 26 Potongan Gelagar Komposit 87
Gambar 5. 27 Distribusi Beban Angin Struktur (E_{WS}) 100
Gambar 5. 28 Eksentrisitas Lokasi Pusat Prategang 112
Gambar 5. 29 Posisi Trace Pada Tiap Tendon 121
Gambar 5. 30 Posisi Tendon 121
Gambar 5. 31 Posisi Eksentrisitas Tendon Saat Transfer 123
Gambar 5. 32 Posisi Eksentrisitas Tendon Saat Final Nonkomposit 125
Gambar 5. 33 Posisi Eksentrisitas Tendon Saat Final Komposit 128
Gambar 5. 34 Kehilangan Pretegang Akibat Anchorage Set 131
Gambar 5. 35 Tegangan Pada Saat Transfer 148
Gambar 5. 36 Tegangan Pada Saat Konstruksi 150
Gambar 5. 37 Tegangan Pada Saat Layan 154
Gambar 5. 38 Area Desain Tulangan Longitudinal 158
Gambar 5. 39 Penulangan Pada PCI Girder 159
Gambar 5. 40 Keterangan Variabel Perhitungan 160
Gambar 5. 42 Dimensi dan Tipe Angkur 170
Gambar 5. 43 Dimensi Pelat Angkur 171
Gambar 5. 44 Posisi Tendon Memanjang 173
Gambar 5. 45 Detail Angkur dan Tendon Pada Tumpuan 173

Gambar 5. 46 Kebutuhan Strand 173
Gambar 5. 47 Penulangan Bursting 173

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Eksisting Jembatan Perning Kloji 179
Lampiran 2 Spesifikasi PCI Girder WIKA Beton 180
Lampiran 3 Mutu Beton Dan Jumlah Segmen PCI Girder WIKA Beton 181
Lampiran 4 Data Penyidikan Tanah 182
Lampiran 5 Lokasi Perencanaan Jembatan 183
Lampiran 6 Hasil Perencanaan 183

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

Ae	=	Luas penampang efektif
As	=	Luas penampang tulangan
Ag	=	Luas penampang kotor
Ant	=	Luas penampang bersih
Ast	=	Luas satu buah tulangan
b	=	Lebar tinjauan
b_0	=	Keliling kritis
B	=	Lebar
B'	=	Lebar penampang kritis
Be	=	Lebar efektif
Bx	=	Lebar arah memanjang jembatan
By	=	Lebar arah melintang jembatan
C	=	Kohesi tanah
Cc	=	Gaya desak pada beton
Cs	=	Gaya tarik pada beton
Csm	=	Koefisien respons gempa
D	=	Diameter
d	=	Tinggi efektif beton
dp	=	Diameter tulangan pokok
db	=	Diameter tulangan bagi
E	=	Modulus elastisitas baja
Ec	=	Modulus elastisitas beton
f'c	=	Kuat tekan beton
g	=	Percepatan gravitasi
h	=	Tinggi
H	=	Gaya penyebab geser pondasi

Ha	=	Kapasitas dukung izin lateral pile
I	=	Inersia
Ka	=	Koefisien tekanan tanah aktif
L	=	Panjang
Mgl	=	Momen penyebab guling
Mu	=	Momen ultimit
Mn	=	Momen nominal
Mw	=	Momen penahan guling
n	=	Jumlah
P	=	Gaya aksial
Pu	=	Gaya aksial ultimit
Pn	=	Gaya aksial nominal
q	=	Berat terdistribusi
Qu	=	Kapasitas dukung pondasi
R	=	Faktor modifikasi respon
Rn	=	Tahanan momen nominal
s	=	Jarak
sb	=	Selimut beton
SF	=	Faktor aman
t	=	Tebal
T	=	Waktu periode getar struktur
Vu	=	Beban geser ultimit (kN)
Vn	=	Beban geser nominal (kN)
Vc	=	Kuat geser beton (kN)
Vs	=	Kuat geser tulangan (kN)
W	=	Berat
α	=	Koefisien muai temperatur
β	=	Sudut pada urukan terhadap garis horizontal
$\beta 1$	=	Faktor distribusi tegangan beton
θ	=	sudut pada dinding belakang terhadap garis horizontal

γ	=	Berat volume
ρ	=	Rasio tulangan yang diperlukan
ρb	=	Rasio tulangan balance
ρmax	=	Rasio tulangan maksimum
ρmin	=	Rasio tulangan minimum
σ	=	Tegangan
φ	=	Sudut geser dalam
$\emptyset$	=	Faktor distribusi tegangan lentur
$K^R \emptyset$	=	Faktor pengurangan kekuatan (0,7)
Δ	=	Lendutan pada girder
N_B	=	Nnilai N'-SPT koreksi rata rata dari lapisan pendukung
η	=	Koefisien efisiensi kelompok tiang pancang

ABSTRAK

Jembatan Perning Kloji yang terletak di Kabupaten Mojokerto merupakan infrastruktur penting yang berfungsi sebagai penghubung antarwilayah. Seiring berjalannya waktu, jembatan ini mengalami penurunan fungsi akibat kerusakan pada dinding penahan tanah yang menyebabkan pergeseran salah satu pilar. Oleh karena itu, diperlukan perencanaan ulang struktur atas jembatan. Sebagai solusi, digunakan *Prestressed Concrete I Girder* (PCI Girder) tipe H-210 yang dinilai mampu memberikan kekuatan tinggi, durabilitas baik, serta efisiensi waktu konstruksi.

Metode penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data eksisting jembatan, menentukan dimensi elemen struktur, menganalisis pembebanan berdasarkan SNI 1725:2016, dan melakukan perencanaan struktur menggunakan perangkat lunak SAP2000 serta *Microsoft Excel*. Perencanaan mencakup analisis gaya prategang, kontrol tegangan, lendutan, serta perhitungan kebutuhan tendon dan tulangan. Jembatan direncanakan memiliki panjang 50 meter dan lebar 11 meter.

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur atas jembatan dengan PCI Girder tipe H-210 yang memiliki jarak antar girder sejauh 1,4 meter dengan mutu beton f'c = 61,2 MPa, Setiap girder direncanakan memiliki 4 tendon dengan total 52 strands. Sedangkan pelat lantai jembatan dengan mutu beton f'c = 28,6 MPa didesain setebal 0,2 meter, dilengkapi tulangan pokok D16-120 dan tulangan pembagi D13-120. Desain ini aman terhadap lentur, geser, dan defleksi karena seluruh nilai tegangan dan lendutan masih berada di bawah batas izin sesuai standar yang berlaku.

Kata kunci: Jembatan, PCI Girder, Beton Prategang, Pelat.

ABSTRACT

The Perning Kloji Bridge, located in Mojokerto Regency, is an important piece of infrastructure that serves as a linkbetween regions. Over time, this bridge has experienced a decline infunction due to damage to the retaining wall, which caused the shifting ofone of the pillars. Therefore, aredesign of the bridge structure was necessary. As a solution, a PrestressedConcrete I Girder (PCI Girder) type H-210, which is considered capable of providinghigh strength, good durability, and construction time efficiency.

The research method was carried out by collecting data onthe existing bridge, determining the dimensions of the structural elements, analyzing the loadbased on SNI 1725:2016, and planning the structure usingSAP2000 software and Microsoft Excel. The planning included an analysis ofprestressing forces, stress control, deflection, and calculations of the requirements for tendonsand reinforcement. The bridge is planned to be 50 meters long and 11 meters wide.

The analysis results show that the upper structure of thebridge with an H-210 type PCI Girder has adistance between girders of 1.4 meters with a concrete quality of f'c = 61.2 MPa. Eachgirder is planned to have 4 tendons with a total of 52 strands. Meanwhile, the bridge floor slab with concrete quality f'c = 28.6 MPa is designed to be 0.2 meters thick,equipped with D16-120 main reinforcement and D13-120 divider reinforcement. This design is safe against bending, shearing, and deflection becauseall stress and deflection values are still below the permissible limits.

Keywords: Bridge, PCI Girder, Prestressed Concrete, Slab.

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jembatan adalah sebuah konstruksi untuk menyeberangi penghalang fisik, seperti jalan, rel kereta api, lembah, atau badan air, agar tidak menghambat lalu lintas. Jembatan memiliki manfaat yang signifikan, baik dari segi transportasi, ekonomi, sosial, maupun lingkungan. Jembatan berperan penting pada segi transportasi dan mobilitas karena dengan adanya jembatan, jarak tempuh dapat dipersingkat, mengurangi waktu perjalanan, dan meningkatkan efisiensi transportasi. Dari segi ekonomi jembatan juga mendukung perdagangan dan aktivitas bisnis dengan memfasilitasi pergerakan barang dan jasa. Dengan jembatan masyarakat dapat lebih mudah mengakses fasilitas pendidikan, kesehatan, ataupun kebutuhan lain yang terletak di sisi lain penghalang geografis.

Jembatan Perning Kloji merupakan salah satu infrastruktur vital yang menghubungkan wilayah kabupaten Mojokerto dengan daerah sekitarnya. Jembatan ini melintasi Sungai Brantas dan menjadi jalur transportasi utama bagi masyarakat setempat, baik aktivitas ekonomi maupun sosial. Jembatan eksisting perning kloji memiliki 3 bentang, yakni 15 meter, 16 meter, dan 15 meter, 2 abutmen, dan 2 pilar model tiang pancang.

Beberapa alasan yang mendasari perlunya perencanaan ulang Jembatan Perning Kloji ini diantaranya adalah umur jembatan yang sudah tua. Jembatan Perning Kloji ini dibangun pada tahun 1982 dan telah beroperasi selama kurang lebih 41 tahun. Seiring berjalannya waktu, struktur jembatan mengalami penurunan kekuatan akibat beban lalu lintas yang terus meningkat serta faktor cuaca dan lingkungan. Peningkatan pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi di wilayah sekitar jembatan ini juga telah menyebabkan peningkatan volume lalu lintas yang siginifikan. Jembatan ini sudah tidak layak pakai karena dinding penahan tanah

sudah megalami kerusakan dan mengakibatkan bergesernya salah satu pilar jembatan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penggantian jembatan.

Dalam perencanaan ulang struktur atas jembatan Perning Kloji, salah satu alternatif yang akan dipertimbangkan adalah penggunaan *PCI girder* (*Precast/Prestressed Concrete Girder type I*) sebagai komponen utama struktur jembatan. *PCI girder* merupakan balok beton prategang yang diproduksi di pabrik dengan kontrol kualitas yang ketat, sehingga memiliki kekuatan dan keandalan yang tinggi. Penggunaan *PCI girder* dalam perencanaan ulang jembatan Perning Kloji ini diharapkan dapat memberikan beberapa keuntungan, seperti waktu konstruksi yang lebih cepat dan efisien, kualitas dan kekuatan struktur yang lebih terjamin, kemudahan dalam proses pemasangan dan perakitan, umur layanan yang lebih panjang, serta biaya pemeliharaan yang lebih rendah.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, maka rumusan masalah dalam tugas akhir ini dapat dirinci sebagai berikut:

1. Bagaimana pembebanan pada struktur atas jembatan yang memanfaatkan teknologi PCI Girder H-210?
2. Berapa kebutuhan jumlah tendon prategang pada struktur atas jembatan yang menggunakan PCI Girder H-210?
3. Berapa kebutuhan jumlah penulangan pada struktur atas atas jembatan dengan PCI-Girder H-210 untuk menahan gaya – gaya yang bekerja?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah disampaikan diatas, maka tujuan penelitian dalam tugas akhir ini dapat dirinci sebagai berikut:

1. Untuk mendapatkan hasil pembebanan pada struktur atas jembatan Perning Kloji dengan menggunaan PCI Girder H-210.
2. Untuk mendapatkan hasil kebutuhan tendon prategang pada struktur atas jembatan PCI Girder H-210 serta memastikan kestabilan struktur akibat pengaruh gaya prategang.

3. Untuk mendapatkan hasil kebutuhan penulangan yang dapat menahan gaya – gaya yang bekerja pada struktur atas jembatan PCI Girder H-210 serta menjamin kapasitas penulangan yang memadai dalam menjaga kestabilan struktur.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi penulis, penelitian ini dapat menambah wawasan dan pemahaman mengenai perencanaan struktur atas jembatan dengan menggunakan PCI Girder H-210, sehingga dapat meningkatkan kompetensi dalam bidang teknik sipil.
2. Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi atau bahan pembanding terhadap desain jembatan Perning Kloji, baik dalam aspek perhitungan struktur maupun penerapan standar perencanaan yang digunakan.
3. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi yang jelas mengenai tahapan perencanaan struktur atas jembatan dengan teknologi PCI Girder. Selain itu, penelitian ini juga dapat menjadi acuan dalam pengembangan penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan perencanaan jembatan berbasis beton prategang.

1.5 Batasan Penelitian

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, ditetapkan batasan masalah agar fokus penelitian tetap terarah dan tidak melebar ke luar lingkup kajian. Dengan demikian, topik yang dibahas lebih spesifik sesuai tujuan penelitian. Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi kasus dalam penelitian ini adalah Jembatan Perning Kloji yang berada di Kabupaten Mojokerto dengan bentang 50 meter dan lebar 11 meter.
2. Perencanaan Struktur atas jembatan meliputi gelagar PCI *girder* dan pelat lantai jembatan.
3. Peraturan yang digunakan dalam analisis sebagai berikut
   a. Peraturan Standar Pembebanan untuk Jembatan (SNI 1725:2016)

b. Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021.
c. Standar perancangan struktur beton untuk jembatan (RSNI T-12-2004)

4. Analisis perhitungan pada penelitian ini menggunakan *software* SAP2000 dan *Microsoft Excel.*
5. Hasil perencanaan detail struktur jembatan digambara menggunakan *software* AutoCAD.
6. Perencanaan ini tidak mencakup Rencana Anggaran Biaya (RAB).

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Tinjauan Pustaka adalah ringkasan dari pendapat, pandangan, dan hasil penelitian terkait topik serupa, yang bertujuan memberikan landasan teori yang kuat untuk penelitian dengan meringkas teori, konsep, dan temuan penelitian sebelumnya yang terkait, serta memberikan gambaran dan masukan untuk perancangan yang akan dilakukan agar mendapatkan kesimpulan yang berkesinambungan. Perancangan jembatan telah banyak diteliti oleh akademisi dan praktisi, sehingga hasilnya dapat dijadiakan rujukan dan dipertanggungjawabkan, mempermudah penelitian selanjutnya, dan mempengaruhi hasil penelitian yang akan dilakukan.

Bab ini membahas hasil tinjauan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan perencanaan jembatan menggunakan *prestressed concrete I girder*, serta menguraikan perbedaan penelitian ini dengan penelitian – penelitian sebelumnya.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai perencanaan ulang jembatan yang ada telah banyak dilakukan oleh akademisi sebelumnya. Hal ini memberikan banyak referensi bagi perencanaan dan penelitian yang akan dilakukan. Pada penelitian ini mengacu pada penelitian sejenis yang pernah dilakukan sebelumnya, anatara lain sebagai berikut.

2.2.1 Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan Sungai Mesim Menggunakan PCI *Girder* Berdasarkan Pembebanan SNI 1725-2016

Mayandra et al. (2021) melakukan penelitian pada jembatan Sungai Mesim di desa Sukarjo Mesim, kecamatan Rupat. Penelitian ini meliputi pembebanan dan analisa struktur atas pada jembatan, perencanaan dimensi jembatan, perhitungan

BBS (*Bar Bending Schedule),* perhitungan RAB (Rencana Anggaran Biaya), dan gambar desain struktur atas jembatan. Jembatan ini memiliki panjang 52 meter, lebar 7,5 meter dengan 2 bentang menerus.

Pada perencanaan ulang struktur atas jembatan sungai mesim ini analisis perhitungan menggunakan alat bantu *software microsoft excel 2010*. Pada penelitian ini beton prategang yang digunakan memiliki spesifikasi f'c 50 MPa, E_c 33234,03 MPa. Sedangkan untuk beton bertulang menggunakan spesifikasi fc' 24,9 MPa, E_c 23452,953 Mpa. Pada perencanaan girder untuk bentang 1 dan bentang 2 menggunakan PCI H-210 yang diproduksi oleh PT. Wijaya Karya (Wika) Beton. Tahapan pada penelitian ini meliputi perhitungan struktur atas, perencanaan trotoar dan tiang sandaran, analisis beban dan perhitungan diafragma, dan perhitungan balok prategang (PCI Girder). Pembahasan pada penelitian ini terfokus pada Perhitungan PCI girder yang membahas tentang penentuan lebar efektif plat lantai, *section properties* balok prategang dan balok setelah komposit, pembebanan balok prategang, perhitungan gaya prategang, eksentritas, dan tendon, *loss of prestress* pada kabel, tegangan yang terjadi pada balok komposit, kontrol tegangan terhadap kombinasi pembebanan, pembesian *end block*, perhitungan *shear connector*, lendutan balok, tinjauan ultimit balok *prestress* setelah *grouting*, perencanaan perletakan, perhitungan *bar bending schedule*, dan perhitungan recana anggaran biaya.

Berdasarkan hasil analisis didapatkan perencanaan slab dengan panjang 52 m, lebar 7,5 m, tebal 0,2 m, dan nilai M_u maksimum 36,132 kNm dan 30,824 kNm. Untuk perencanaan trotoar memiliki panjang 52 m, lebar 0,75 m, tebal 0,25 m, dan nilai M_u sebesar 34,511 kNm. Untuk perencanaan tiang sandaran dimensi yang di dapat adalah lebar 0,15 m, tebal 0,15 m, tinggi 1,32 m, dan nilai M_u sebesar 2,590 kNm. Sedangkan untuk perencanaan diafragma menggunakan ukuran 1,65 x 0,20 m, dan nilai M_u sebesar 4,01 kNm. Dimensi PCI Girder yang digunakan yaitu dimensi H-210 cm, jumlah girder dalam perencanaan ini sebanyak 4 unit yang terdiri dari 8 segmen, dan dalam satu PCI Girder terdiri dari 5 tendon. Pada perencanaan ini perletakan jembatan menggunakan perletakan *elastomer bearing* dengan ukuran 350 x 700 x 8 mm. Perencanaan ini juga mendapatkan perhitungan

bar bending schedule dan didapatkan jumlah besi yang digunakan yakni besi U-39 ulir sebanyak 11151,96 kg dan besi U-24 polos sebnayak 483,62 kg. Untuk hasil perhitungan rekapitulasi biaya pekerjaan struktur atas jembata Sungai Mesim ini mencapai Rp. 4.019.600.000,00.

Pada penelitian ini terdapat beberapa keterbatasan, yaitu penggunaan peraturan lama yakni SNI T-12-2004 dan SNI T-03-2005 sedangkan pada saat penelitian ini dilakukan sudah terbit peraturan terbaru, yaitu Standar Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725-2016 dan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021. Selain itu penelitian ini juga tidak membahas tentang perencanaan struktur bawah jembatan, sehingga perencanaan ulang pada jembatan Sungai Mesim ini tidak menyeluruh.

2.2.2 Perencanaan Ulang Jembatan Bae-Basito (Karangsambung) dengan PCI Girder.

Suseno (2023) melakukan penelitian berjudul Perencanaan Ulang Jembatan Bae-Besito (Karangsambung) dengan PCI Girder pada tahun 2023. Struktur atas pada jembatan eksisting karangsambung ini berupa rangka baja dengan tipe jembatan *Railway*. Bentang jembatan eksisting ini sebesar 68 meter dengan lebar yang terbilang kecil yakni 2,8 meter. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan rancangan struktur atas dan struktur bawah jembatan karangsambung.

Pada perencanaan ulang Jembatan Karangsambung ini girder yang akan digunakan adalah PCI Girder dari Wika Beton tipe H-210. Analisi pada perencanaan ini dilakukan denga bantuan *software* SAP 2000 dan *Microsoft Excel.* Penelitian ini mengacu pada Standar Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725-2016, Beban Gempa untuk Jembatan SNI 2833:2016, Peraturan Perancangan Struktur Beton untuk Jembatan RSNIT-12-2004, dan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021.

Berdasarkan hasil analisa, didapatkan perencanaan struktur bawah jembatan ini adalah abutmen tipe T dengan tinggi 4,5 meter, pondasi tiang pancang diameter 0,8 meter sebanyak 20 buah, pilar kolom tunggal berukuran 1,2 meter x 7 meter dengna tinggi 7,1 meter, serta pelat lantai beton bertulang mempunyai ketebalan

250 mm. Untuk perencanaan struktur atas jembata ini menggunakan gelagar profil I-girder tipe H-210 dengan mutu beton f'c 50 Mpa dan jarak pemasangan antar girder 1,85 meter. Keterbatasan pada penelitian ini adalah belum memepertimbangkan pembebanan pada gelagar tepi yang cenderung kantilever, serta tidak memperhitungkan pembiayaan.

2.2.3 Perencanaan Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo Menggunakan PCI *Girder*

Nusantoro et al., (2022) melakukan penelitian berjudul Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo dengan Menggunakan PCI *Girder* pada tahun 2022. Penelitian ini merencanakan jembatan sepanjang 16 m dan lebar 7 m menggunakan beton prategang pascatarik (*post-tension*) tipe PCI girder. Tahapan perencanaan mencakup perhitungan dimensi girder, pembebanan sesuai SNI 1725-2016, penentuan tata letak tendon, analisis kehilangan gaya prategang, tegangan, kontrol lendutan, pembesian, serta penggambaran.

Hasil analisis menunjukkan bahwa mutu beton balok yang digunakan adalah K-500 (fc' = 41,5 MPa) dengan tinggi penampang 0,9 meter dan terdiri atas dua batang. Tulang rusuk pertama memiliki tujuh untai, sedangkan rusuk kedua terdiri atas dua belas untai baja prategang berdiameter 12,7 mm dengan spesifikasi VSL. Gaya pratekan awal sebesar 2080,651 kN dan gaya pratekan efektif setelah kehilangan pratekan sebesar 1759,921 kN, dengan total kehilangan pratekan sebesar 28,10%. Tegangan serat atas beton pada kondisi awal sebesar 0,447 MPa masih berada di bawah tegangan tarik izin 1,44 MPa, sedangkan tegangan serat bawah sebesar -13,847 MPa juga tidak melampaui batas tegangan tekan izin -19,92 MPa, sehingga tidak terjadi keretakan. Pada kondisi akhir, tegangan serat bagian atas pelat sebesar -0,107 MPa, serat atas balok sebesar -1,623 MPa, dan serat bawah balok sebesar -8,447 MPa masih berada di bawah tegangan tekan izin -18,68 MPa, sehingga struktur aman terhadap retak tekan. Nilai momen ultimit akibat kombinasi pembebanan (Mu) sebesar 2140,380 kNm lebih kecil dari kapasitas momen ultimit balok prategang (ØMn) sebesar 2268,381 kNm, serta lendutan total girder sebesar 0,0191 m masih di bawah lendutan izin 0,0533 m, sehingga dapat disimpulkan

bahwa balok prategang yang digunakan dinyatakan aman terhadap tegangan, momen, dan lendutan.

2.3 Keabsahan Penelitian

Pada penelitian – penelitian terdahulu masih terdapat beberapa keterbatasan, yaitu penggunaan peraturan lama yakni SNI T-12-2004 dan SNI T-03-2005 sedangkan pada saat penelitian dilakukan sudah terbit peraturan terbaru, yaitu Standar Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725-2016 dan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021.

Penelitian yang akan dilakukan saat ini adalah Perencanaan Struktur Atas Jembatan Perning Kloji di Mojokerto Menggunakan PCI Girder. Perencanaan yang dilaksanakan mencakup struktur atas jembatan yang terdiri dari gelagar PCI Girder dan pelat lantai jembatan. Dalam perencanaannya, acuan yang digunakan adalah Standar Pembebanan untuk Jembatan (SNI 1725:2016) serta Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/M/2021. Perbedaan antara penelitian ini dengan penelitian sebelumnya yang menjadi dasar keaslian penelitian dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dan Sekarang

Nama Peneliti	Penelitian Terdahulu			Penelitian yang dilakukan
	Ilham Mayandra	**Rangga Suseno**	**Agung Nusantoro dkk.**	**Rifdatun Nabilah**
Tahun	**2021**	**2023**	**2022**	**2025**
Judul penelitian	Perencanaan Ualang Struktur Atas Jembatan Sungai Mesim Menggunakan PCI Girder Berdasarkan Pembebanan SNI 1725:2016	Perencanaan Ulang Jembatan Bae-Basito (Karangsambung) dengan PCI Girder	Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo Menggunakan PCI Girder	Perencanaan Struktur Atas Jembatan Perning Kloji di Mojokerto Menggunakan PCI Girder
Latar Belakang	Jembatan mengalami retak dan kropos pada bagian lantai jembatan, sehingga perlu dilakukan perencanaan ulang jembatan	Lebar jembatan yang tidak memadai mengakibatkan antrean kemacetan pada jam sibuk, sehingga perlu dilakukan perencanaan ulang jembatan	Usia jembatan yang terbilang tua mengakibatkan jembatan mengalami kerusakan, sehingga perlu dilakukan perencanaan ulang jembatan	Bergesernya salah satu pilar akibat dinding penahan yang roboh membuat jembatan tidak layak pakai danperlu dilakukan perencanaan ulang jembatan

Lanjutan Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dan Sekarang

Nama Peneliti	Ilham Mayandra	Rangga Suseno	Agung Nusatoro dkk.	Rifdatun Nabilah
Desain	Struktur Atas	Struktur Atas dan Bawah	Struktur Atas	Struktur Atas
Jenis jembatan	Beton Prategang	Beton Prategang	Beton Prategang	Beton Prategang
Profil Gelagar	I-Girder	I-Girder	I-Girder	I-Girder
Bentang	52 m	70 m	16 m	50 m
Lokasi	Bengkalis	Kudus	Purworejo	Mojokerto

Penelitian sebelumnya memiliki keterbatasan, seperti masih menggunakan peraturan lama (SNI T-12-2004 dan SNI T-03-2005) meskipun sudah tersedia peraturan terbaru (SNI 1725-2016 dan Panduan Praktis Perencanaan No.02/M/BM/2021). Penelitian ini bertujuan untuk merancang Struktur Atas Jembatan Perning Kloji di Mojokerto menggunakan PCI Girder, mencakup struktur atas (gelagar PCI girder dan pelat lantai) dengan mengacu pada peraturan terbaru.

BAB III
LANDASAN TEORI

3.1 Pengertian Jembatan

Jembatan adalah sebuah konstruksi untuk menyeberangi penghalang fisik, seperti jalan, rel kereta api, lembah, atau badan air, agar tidak menghambat lalu lintas. Jembatan memiliki manfaat yang signifikan, baik dari segi transportasi, ekonomi, sosial, maupun lingkungan. Jembatan berperan penting pada segi transportasi dan mobilitas karena dengan adanya jembatan, jarak tempuh dapat dipersingkat, mengurangi waktu perjalanan, dan meningkatkan efisiensi transportasi. Menurut Fah Chen & Duan (1999) jembatan adalah struktur yang menyediakan jalan melewati suatu rintangan tanpa menutup jalan di bawahnya. Jalan yang diperlukan mungkin untuk kendaraan, kereta api, pejalan kaki, kanal, atau pipa saluran.

3.2 Tipe Jembatan

Perkembangan teknologi membuat semua hal berinovasi, seperti halnya pada bidang konstruksi jembatan yanga telah mengalami kemajuan. Beberapa jenis jembatan dapat diklasifikasikan berdasarkan kriteria. Berikut ini merupakan jenis jenis jembatan

1. Menurut Supriyadi & Muntohar Setyo (2007). Jenis jembatan berdasarkan bahan konstruksinya terbagi menjadi 4 jenis, yakni
    a. Jembatan kayu
    b. Jembtaan baja
    c. Jembatan beton bertulang dan prategang
    d. Jembatan komposit

2. Menurut J Zhao & E Tonias (2012). Jenis jembatan berdasarkan sistem strukturnya terbagi menjadi 8 jenis, yakni
   a. Jembatan bentang sederhana (*simple span bridges*)
   b. Jembatan bentang menerus (*continuous span bridges*)
   c. Jembatan rangka (*truss bridges*)
   d. Jembatan rangka kaku (*rigid frame bridges*)
   e. Jembatan pelengkung (*archbridges*)
   f. Jembatan gantung (*suspension bridges*)
   g. Jembtan kabel (*cable-stayed bridges*)
   h. Jembatan kantilever (*cantilever bridges*)
3. J Struyk & Der Veen (1984) menyatakan Jenis jembatan berdasarkan sifatnya terbagi menjadi 2 jenis, yakni
   a. Jembatan tetap
   b. Jambatan dapat digerakkan
4. Christandy Hardiyatmo (2007) menyatakan Jenis jembtana berdasarkan fungsinya terbagi menjadi 4 jenis, yaitu
   a. Jembatan jalan raya
   b. Jembatan kereta api
   c. Jembatan pejalan kaki
   d. Jembatan pipa (*utilities*)

3.3 Komponen pada Jembatan

Jembatan memiliki 4 komponen utama yaitu sebagai berikut

1. Superstruktur jembatan atau bangunan atas
2. Substruktur jembatan atau bangunan bawah
3. Jalan Pendekat (*oprit*)
4. Bangunan Pengaman

3.3.1 Bangunan Atas Jembatan

Bangunan atas jembatan merupakan bagian dari jembatan yang berperan sebagai penerima beban lalu lintas secara langsung dan mendistribusikan beban

tersebut ke struktur bawah (S Troitsky, 1994). Berikut ini bagian – bagian jembatan yang termasuk dalam struktur atas jembatan

1. Lantai jembatan
2. Girder atau balok utama
3. Rangka pengaku
4. Diafragma
5. Trotoar
6. Railing atau pagar pengaman

3.3.2 Bangunan Bawah Jembatan

Bangunan bawah jembatan adalah elemen – elemen jembatan yanga berada di bawah *bearing*. Fungsi utama dari struktur bawah jembatan yaitu mentransfer beban – beban yang diterima struktur atas ke tanah. Perencanaan struktur bawah harus dapat menahan beban mati dan hidup dari struktur atas, menahan tekanan tanah lateral, menahan gaya hidrostatik untuk jembatan di atas air, menahan beban angin dan gempa, serta dapat menahan gaya rem dan fraksi dari kendaraan (Fah Chen & Duan, 1999). Berikut ini bagian – bagian jembatan yang termasuk dalam struktur bawah jembatan

1. *Abutment*
2. Pilar
3. Pondasi

3.3.3 Jalan Pedekat (*oprit*)

Jalan pendekat atau *oprit* adalah bagian jembatan yang menghubungkan struktur jembatan dengan jalan utama. Fungsi dari jalan pendekat atau *oprit* ini adalah untuk mengatasi perbedaan elevasi antara permukaan tanah asli dan lantai jembatan. Untuk perencanaan jalan pendekat atau *oprit* ini perlu memperhatikan beberapa aspek penting diantaranya stabilitas lereng, penurunan tanah, drainase yang efektif, keselarasan geometris dengan jalan utama, serta panjang transisi yang cukup agar menciptakan kenyamanan bagi pengendara.

3.3.4 Bangunan Pengaman

Bangunan pengaman adalah elemen – elemen yang ditambahkan pada jembatan yang bertujuan untuk meningkatkan keaman bagi pengguna jembatan dan juga dapat melindungi struktur jembatan itu sendiri. Adapun beberapa jenis bangunan pengaman jembatan diantaranya adalah *Guardrail* atau pagar pengaman, Parapet, *median barier*, *crash cushion*, dan *fender systems.*

3.4 Jembatan Gelagar

Jembatan gelagar adalah salah satu jenis jembatan dengan balok horizontal sebagai elemen struktural utama yang didukung oleh abutmen di kedua ujungnya untuk menopang beban *deck* dan lalu lintas. Jembatan gelagar merupakan jenis jembatan paling sederhana dan sering dijumpai di indonesia. Untuk mendesian jembatan gelagar terdapat beberapa aspek penting yang perlu di perhatikan seperti analisis distribusi beban lateral, desain untuk beban dinamis, pertimbangan *fatigue* untuk gelagar jenis baja, serta kontrol defleksi (J Zhao & E Tonias, 2012).

Jika ditinjau dari materialnya jembatan gelagar memiliki beberapa jenis, sperti gelagar baja, gelagar beton bertulang, gelagar beton prategang, dan gelagar komposit (kombinasi baja dan beton). Kelebihan dari jebatan gelagar ini diantaranya adalah konstruksinya relatif sederhana, dari segi biaya terbilang lebih rendah, mudah dalam pemeliharaan, dan fleksibel dalam desain dan fabrikasinya. Namun, jembatan jenis gelagar ini juga memiliki kekerungan diantaranya adalah rentan terhadap korosi, terdapat keterbatasan untuk bentang – bentang yang sangat panjang. (Barker Richard & Puckett, 2007) menyatakan jembatan gelagar umumnya efektif untuk bentang hingga 60 meter.

3.5 Balok Pracetak

Balok pracetak atau *precast girde*r adalah elemen struktural berupa balok beton yang diproduksi di luar lokasi proyek, biasanya didatangkan dari pabrik dengan kualitas yang sudah terkontrol kemudian dikirim ke lokasi proyek untuk dipasang menjadi satu kesatuan struktur yang utuh. Balok pracetak memiliki banyak keunggalan diantaranya sebagai berikut

1. Kualitas produk yang lebih terkontrol
2. Mempercepat waktu konstruksi
3. Membuat pekerjaan di proyek menjadi lebih efisien
4. Meminimalisir limbah konstruksi di lokasi proyek.

Penggunaan balok pracetak dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi proyek dan kualitas struktur pada berbagai konstruksi khususnya konstruksi jembatan. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan digunakan balok jenis balok beton prategang profil I atau disebut juga *prestressed concrete I.*

3.6 Konsep Balok Prategang

Balok prategang atau *prestressed girder* adalah balok beton yang diberikan tegangan tekan internal sebelum dibebani dengan tujuan mengurangi atau menghilangkan tegangan tarik potensial dalam beton akibat beban kerja. Balok prategang memiliki hubungan yang erat dan juga fundamental dengan tendon

Tendon merupakan komponen kunci dalam balok prategang yang digunakan untuk memberikan gaya prategang pada beton. Jenis tendon biasanya berupa kawat tunggal, untaian kawat (*strand*), bisa juga berupa batang baja. Fungsi dari tendon ialah menginduksi gaya tekan pada beton, sebagai penyeimbang tegangan tarik dari beban eksternal, serta dapat menambahakan kapasitas lentur dan geser balok.

Penggunaan balok prategang dinilai efektif dalam meningkatkan efisiensi proyek dan kualitas struktur pada konstruksi jembatan. Adapun beberapa keunggulan balok prategang pada konstruksi jebatan sebagai berikut.

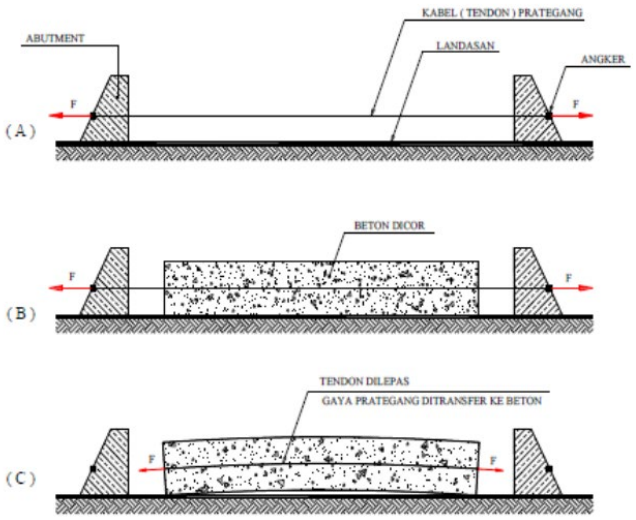
1. Dari segi mutu balok prategang memiliki mutu yang lebih tinggi dari balok dengan beton konvensional.
2. Balok prategang dapat ikut serta menahan momen lentur pada semua bagian penampangnya saat kondisi layan.
3. Kekakuan yang tinggi serta adanya camber pada balok prategang menyebabkan deformasi yang terjadi menjadi lebih kecil..
4. Gaya prategang yang mengurangi tarik diagonal dan sudut tendon di daerah tumpuan dapat meningkatkan ketahanan geser pada balok prategang.

3.6.1 Metode Prategang

Penarikan pada baja prategang adalah suatu proses dimana baja (tendon) diberikan gaya tarik pada saat sebelum atau setelah beton mengeras, tergangtung pada metode yang digunakan. Penarikan ini bertujuan untuk menghasilkan gaya tekan pada beton akibat pemberian tegangan awal pada baja. Penarikan pada baja prategang ini memiliki dua metode, yaitu

1. Metode Pratarik (*Pretensioning*)

   Metode pratarik adalah suatu teknik dimana tendon prategang ditarik antar angkur yang tetap sebelum beton ditempatkan. Setelah beton mengeras dan mencapai kekuatan yang diinginkan, tendon dilepaskan dari angkur eksternal, lalu mentransfer gaya prategang ke beton melalui ikatan (G Nawi, 2001). Prinsip dari sistem pratarik dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut



Gambar 3. 1 Beton Prategang Pratarik
(*sumber: Edward G. Nawy,2001*)

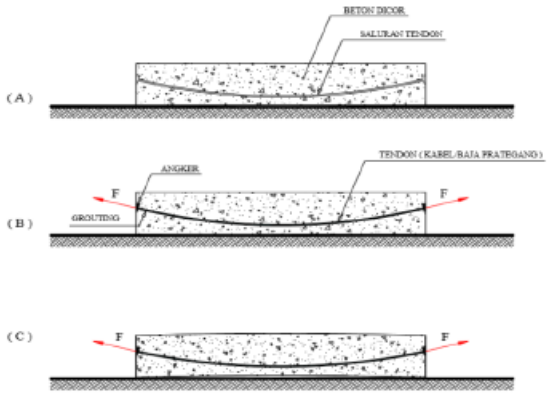
Proses pembuatan beton prategang dilakukan melalui beberapa langkah. Pertama, kabel atau tendon prategang ditarik dan diberi gaya prategang, lalu diikat pada abutmen yang bersifat tetap (lihat gambar A). Kedua, beton dituangkan ke dalam cetakan dan landasan yang telah dipersiapkan sehingga menutupi tendon yang sudah ditarik tersebut. Setelah itu, beton dibiarkan mengeras (gambar B). Ketiga, setelah beton mencapai kekuatan yang

memadai untuk menahan gaya prategang, tendon kemudian dipotong dan dilepaskan, sehingga tegangan prategang berpindah ke beton (gambar C).

Dengan adanya gaya prategang, balok beton akan melengkung ke arah atas terlebih dahulu, memberikan efek angkat sebelum menerima beban. Saat beban bekerja, balok secara bertahap kembali ke posisi datar, yang menunjukkan kemampuan struktur dalam menyeimbangkan serta menahan gaya yang diterimanya.

2. Metode Pascatarik (*Posttensioning*)

Metode prategnag pascatarik adalah suatu teknik dimana tendon ditarik setelah beton mengeras dan sudah mencapai kekuatan tertentu. Selongsong (*duct*) dipasang sesuai dengan jalur tendon yang direncanakan, kemudian beton dicor dengan selongsong di dalamnya, setelah beton mencapai kekuatan yang cukup, tendon dimasukkan ke dalam selongsong, lalu tendon ditarik menggunakan jack hidrolik, setelah mencapai gaya yang direncanakan, tendon dijangkarkan pada ujung – ujung elemen beton. Prinsip dari sistem pascatarik dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut.



Gambar 3. 2 Beton Prategang Pascatarik
(*sumber: Edward G. Nawy,2001*)

Proses pemberian prategang pada beton dilakukan melalui beberapa langkah. Pertama, diawali dengan persiapan cetakan (formwork) yang dilengkapi saluran atau selongsong (tendon duct) sesuai dengan lengkung momen balok, kemudian dilakukan pengecoran beton (Gambar A).

Tahap kedua dilaksanakan setelah beton mencapai umur dan kekuatan yang memadai untuk menahan gaya prategang. Pada tahap ini, tendon dimasukkan ke dalam selongsong dan ditarik sehingga timbul gaya prategang. Proses penarikan dapat dilakukan dengan menambatkan salah satu ujung tendon dan menarik ujung lainnya, atau menarik kedua ujung secara bersamaan sebelum dilakukan penambatan. Setelah itu, saluran diisi dengan grouting melalui lubang yang telah disediakan (Gambar B).

Tahap ketiga terjadi setelah tendon ditambatkan, di mana gaya prategang mulai ditransfer ke beton. Karena tendon dipasang dengan bentuk melengkung, gaya prategang tersebut menghasilkan distribusi gaya ke arah atas yang menyebabkan balok mengalami lendutan positif (camber) (Gambar C).

3.6.2 Tahap Pembebanan Prategang

Pembebanan pada beton prategang tidak hanya dipengaruhi oleh beban eksternal seperti beban mati dan beban lalu lintas, tetapi juga mempertimbangkan efek kombinasi gaya prategang yang bekerja pada penampang beton. Adapun tahapan pembebanan pada beton prategang sebagai berikut

1. Tahap Transfer

   Pada tahap ini, gaya prategang dipindahkan dari tendon ke beton. Pada sistem pratarik, hal ini terjadi pada saat beton masih lunak. Namun, pada sistem pasca tarik, prategang dipindahkan setelah beton mengeras. Pada tahap ini beton mengalami tegangan tekan maksimum, sedangkan tendon mengalami tegangan tarik maksimum. Pada fase ini terjadi kehilangan gaya prategang akibat dari perpendekan elastis beton. Oleh karena itu, kondisi beton harus mencapai kekuatan minimum tertentu sebelum tahap transfer biasanya sekitar 70-80% dari kekutan rencana.

2. Tahap Layanan (*Service*)

   Tahap layanan (*Service*) adalah tahap dimana struktur beton prategang sudah mulai berfungsi sesuai rancangan dan menerima beban yang direncanakan.

Pada tahap ini beban - beban mulai bekerja secara maksimum seperti beban mati, beban hidup, serta beban lingkungan (angin, gempa, dll).

3. Tahap Batas Kekuatan (*Ultimate Load*)

   Tahap batas kekuatan atau *ultimate load stage* adalah kondisi dimana beton prategang dianalisis untuk memastikan keamananya pada beban maksimum yang mungkin terjadi selama masa layannya, yakni kondisi dimana beton mungkin sudah mencapai tegangan puncaknya dan baja prategnag sudah mencapai tegangan leleh.

4. Tahap Beban Tetap (*Sustained Load*)

   Pada tahap ini, beban yang bekerja hanya beban mati. Oleh karena itu, berkemungkinan terjadi lendutan ke atas atau ke bawah. Hal ini yang menjadi faktor penentu dalam perancangan.

3.7 Kondisi Jembatan Eksisting

Data eksisting jembatan merupakan hal yang sangat penting dalam perencanaan sebuah jembatan. Kondisi eksisting dapat menjadi alat bantu atau acuan dalam merancang agar lebih efisien. Kondisi eksisting jembatan Perning Kloji dapat dijelaskan sebagai berikut.

3.7.1 Eksisting Jembatan

Jembatan Perning Kloji merupakan jembatan penghubung lalu lintas yang dipisahkan oleh sebuah sungai. Jembatan ini terletak di kabupaten mojokerto provinsi jawa timur. Untuk menunjang penelitian ini, maka diperlukan data dan gambar dari eksisting jembatan perning kloji. Adapun gambar eksisting jembatan perning kloji terlampir pada Lampiran 1.

Berdasarkan informasi dari gambar yang terlampir dapat diketahui eksisting Jembatan Perning Kloji memiliki bentang sepanjag 50 meter yang dibagi menjadi 3 bentang. Jembatan eksisting ini mengalami pergeseran pada salah satu pilarnya yang disebabkan oleh dinding penahan tanah yang roboh.

3.7.2 Data Tanah

Data tanah pada lokasi perencanaan jembatan diperoleh dari hasil pengujian lapangan menggunakan metode standard penetration test (SPT). Uji ini dilakukan untuk mengetahui nilai N-SPT, yang menggambarkan tingkat kepadatan dan kekuatan tiap lapisan tanah di bawah permukaan. Hasil pengujian tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan parameter teknis tanah, seperti daya dukung izin, klasifikasi jenis tanah, serta karakteristik deformasi tanah yang berpengaruh terhadap perencanaan pondasi jembatan. Adapun data penyidikan tanah jembatan perning kloji terlampir pada Lampiran 4.

Berdasarkan hasil uji SPT pada bore log yang terlampir, kondisi tanah di lokasi penelitian menunjukkan variasi lapisan dengan karakteristik yang berbeda. Pada kedalaman 0–8 m, nilai SPT berada di bawah 10 sehingga tanah dikategorikan sangat lunak hingga lunak, dengan deskripsi berupa lanau kelempungan. Pada kedalaman 8–15 m, nilai SPT meningkat menjadi sekitar 10–16, yang menunjukkan tanah mulai agak kaku dengan lapisan tanah berwarna hitam. Selanjutnya, pada kedalaman 15–20 m, nilai SPT berada pada kisaran 15–21 sehingga dapat dikategorikan sebagai tanah padat dengan jenis lanau, pasir, dan lempung. Pada kedalaman lebih dari 20 m, nilai SPT semakin meningkat hingga mencapai N = 26 pada kedalaman 26 m dan mencapai N = 80 pada kedalaman 30 m, yang menandakan tanah sangat padat atau keras, didominasi oleh lanau kelempungan. Dengan demikian, tanah keras mulai dijumpai pada kedalaman sekitar 20 m, sedangkan lapisan tanah sangat keras terdapat pada kedalaman 30 m.

3.8 Pembebanan

Dalam proses perancangan sebuah jembatan, sangat penting untuk memperhitungkan berbagai beban yang akan dialami jembatan. Beban-beban ini berdampak langsung pada ukuran dan dimensi struktur jembatan, serta jumlah tulangan yang dibutuhkan. Analisis pembebanan bertujuan untuk memastikan keamanan struktur dan memprediksi perilaku struktur dalam berbagai kondisi.

Peraturan SNI 1725:2016 yang menguraikan standar pembebanan jembatan, mengklasifikasikan beban-beban tersebut ke dalam beberapa jenis.

3.8.1 Beban Primer

Beban yang disebabkan oleh besarnya massa jembatan, yang meliputi seluruh komponen tidak bergerak, disebut beban primer atau biasa disebut beban mati. Hal ini mencakup berat balok, gelagar, dek, lantai, pilar, dan perlengkapan lain yang merupakan bagian dari jembatan. Berbeda dengan faktor eksternal seperti lalu lintas atau angin, beban mati tetap konstan sepanjang umur jembatan. Penting untuk mempertimbangkan beban mati pada perencanaan jembatan untuk menjamin integritas dan stabilitas struktural yang diperlukan untuk menopang bobotnya sendiri. Adapun berat isi masing – masing material yang digunakan untuk perhitungan beban mati dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Berat Isi dan Kerapatan Massa untuk Beban Mati

No	Bahan	Berat Isi (kN/m^3)	Kerapatan Massa (kg/m^3)
1	Lapisan permukaan beraspal (*bituminous wearing surface*)	22	2245
2	Besi tulangan (*cast iron*)	71	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan (*compacted sand, silt or clay*)	17,2	1744
4	Kerikil dipadatkan (*rolled gravel macadam or ballast*)	18,8 – 22,7	1920 – 2315
5	Beton aspal (*asphalt concrete*)	22	2245
6	Beton ringan (*low density*)	12,25 – 19,6	11250 – 2000
7	Beton f'c < 35 Mpa	22 – 25	2320

Lanjutan Tabel 3. 1 Berat Isi dan Kerapatan Massa untuk Beban Mati

No	Bahan	Berat Isi (kN/m^3)	Kerapatan Massa (kg/m^3)
	35 < f'c < 105 Mpa	22 + 0,022 f'c	2240 + 2,29 f'c
8	Baja (*steel*)	78,5	7850
9	Kayu ringan (*light wood*)	7,8	800
10	Kayu keras (*hard wood*)	11	1125

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jebatan,2016

(Badan Standarisasi Nasional,2016), Beban mati dibagi menjadi dua macam yaitu berat sendiri (MS) dan beban mati tambahan (MA).

1. Berat sendiri (MS)

Berat sendiri merupakan berat dari komponen itu sendiri dan unsur struktur lain yang dipikulnya, dalam hal ini meliputi berat bahan dan komponen jembatan yang merupakan unsur struktur, ditambah bagian jemabatan nonstruktural yang bersifat tetap. Adapun faktor beban yang digunakan untuk perhitungan berat sendiri dapat dilihat pada Tabel 3.2 dibawah ini

Tabel 3. 2 Faktor Beban untuk Berat Sendiri

Tipe Bahan	**Faktor Beban (γ_{ms})**			
	Keadaan Batas Layan (γ^s_{ms})		**Keadaan Batas Ultimit (γ^u_{ms})**	
	Bahan		**Biasa**	**Tekurangi**
Tetap	Baja	1	1,1	0,9
	Aluminium	1	1,1	0,9
	Beton Pracetak	1	1,2	0,85
	Beton Dicor Di Tempat	1	1,3	0,75
	Kayu	1	1,4	0,70

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan merupakan total berat material yang menjadi beban pada jembatan, namun tidak termasuk berat elemen strukturnya. Besarnya dapat berubah seiring bertambahnya usia jembatan. Pada kondisi tertentu, faktor beban

mati tambahan yang tercantum dalam Tabel 3.3 dapat digunakan, dengan catatan mendapat persetujuan dari pihak berwenang yang mengawasi, agar tidak melampaui masa layan jembatan.

Tabel 3. 3 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan

Tipe Bahan	Faktor Beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ^{s}_{MA})		Keadaan Batas Ultimit (γ^{u}_{MA})	
	Keadaan		Biasa	Tekurangi
Tetap	Umum	1	2	0,7
	Khusus (Terawasi)	1	1,4	0,8

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Tabel diatas berfungsi sebagai pedoman dalam menentukan nilai pengali beban mati tambahan pada jembatan. Nilai faktor ini diperlukan agar beban tidak hanya dihitung berdasarkan berat aktualnya, tetapi juga mempertimbangkan ketidakpastian, variasi material, serta tingkat pengawasan saat pelaksanaan. Tabel tersebut membedakan faktor beban untuk dua kondisi perencanaan, yaitu keadaan batas layan yang digunakan untuk mengecek kenyamanan dan kinerja struktur, serta keadaan batas ultimit yang digunakan untuk memastikan kekuatan dan keamanan jembatan.

3.8.2 Beban Lajur

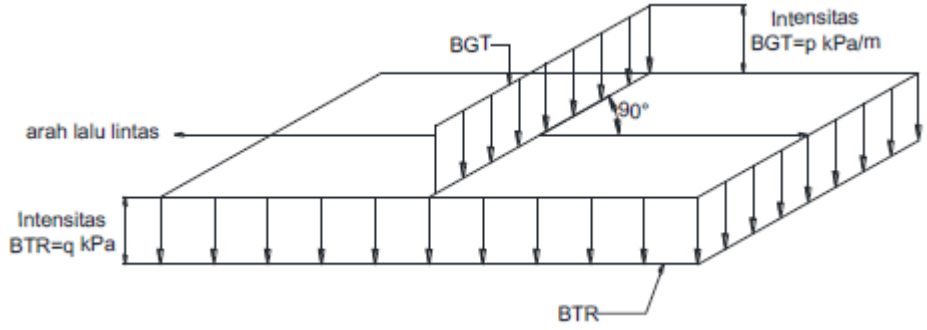
Beban lajur adalah beban yang ditimbulkan pada saat kendaraan melewati jembatan dan didistribusikan pada lajur diatas jembatan. Beban-beban ini mencerminkan efek gabungan dari berbagai jenis kendaraan yang berjalan di sepanjang jembatan, seperti mobil, truk, dan bus.

Dalam perancangan jembatan, beban lajur digunakan untuk simulasi kondisi lalu lintas sebenarnya,dan perancangan dilakukan menurut standar tertentu untuk menjamin bahwa jembatan dapat menahan beban dinamis kendaraa yang melintasinya. Beban lajur ini mencakup faktor – faktor seperti berat kendaraan, kecepatan, dan jarak antar kendaraan, serta distribusi beban sepanjang lajur. Beban

lajur terbagi menjadi dua jenis yaitu beban lajur “D” dan beban truk “T”. Berikut ini penjelasan mengenai kedua beban tersebut.

1. Beban Lajur “D” (TD)

   Beban lajur “D” terdiri atas beban terbagi rata (BTR) yang digabungkan dengan beban garis (BGT) sepeti pada Gambar Berikut ini.



Gambar 3. 3 Beban Lajur “D”

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Baban garis terpusat (BGT) dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensiats p adalah 49 kN/m. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus di tempatkan pada posisi dalam arah melintang jembatan pada bentang lainnya.

Beban “D” harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa. Sehingga menimbulkan momen maksimum. Adapun faktor beban yang digunakan untuk beban lajur seperti pada Tabel 3.4 Berikut ini.

Tabel 3. 4 Faktor Beban untuk Beban Lajaur “D”

Tipe Beban	**Jembatan**	**Faktor Beban (γ_{TD})**	
	Beton	**Keadaan Batas Layan (γ^{S}_{TD})**	**Keadaan Batas Ultimit (γ^{U}_{TD})**
		1	1,8
Transien	Boks gelagar baja	1	2

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Beban terbagi rata (BTR) merupakan beban denga intensitas sebesar q (kPa), diamana besarnya ditentukan berdasarkan panjang total bentang yang

menerima beban, yaitu L. Nilai q akan bervariasi sesuai dengan besarnya panjang bentang yang dibebani sesuai ketentuan berikut ini:

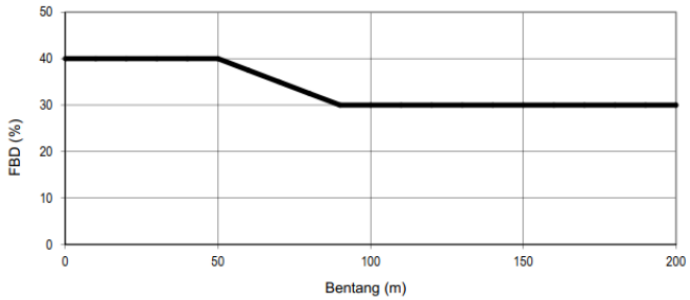
jika $L \leq 30\ m : q = 9{,}0\ kPa$ (3.1)

jika $L > 30\ M : q = 9{,}0\ \left(0{,}5 + \frac{15}{L}\right) kPa$ (3.2)

q = Intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang (kPa)

L = Panjan total jembatan yang dibebani (m).

Besarnya nilai BGT yang berasal dari pembebanan lajur "D" maupun beban roda dari pembebanan truk "T" harus memadai untuk menciptakan interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan, sehingga dikalikan dengan faktor beban dinamis (FBD). Nilai tambahan tersebut dinyatakan sebagai fraksi dari beban statis, dan FDB diterapkan baik pada keadaan batas layan maupun pada keadaan batas ultimit. Sementara itu, beban terbagi rata (BTR) dari pembebanan lajur "D" tidak dikalikan dengan FBD. Penentuan besarnya FBD mengacu pada grafik atau gambar berikut ini.



Gambar 3. 4 Faktor Beban Dinamis Untuk Beban T untuk Pembebanan Laju "D"

(sumber: SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan,2016)

2. Beban Truk "T" (TT)

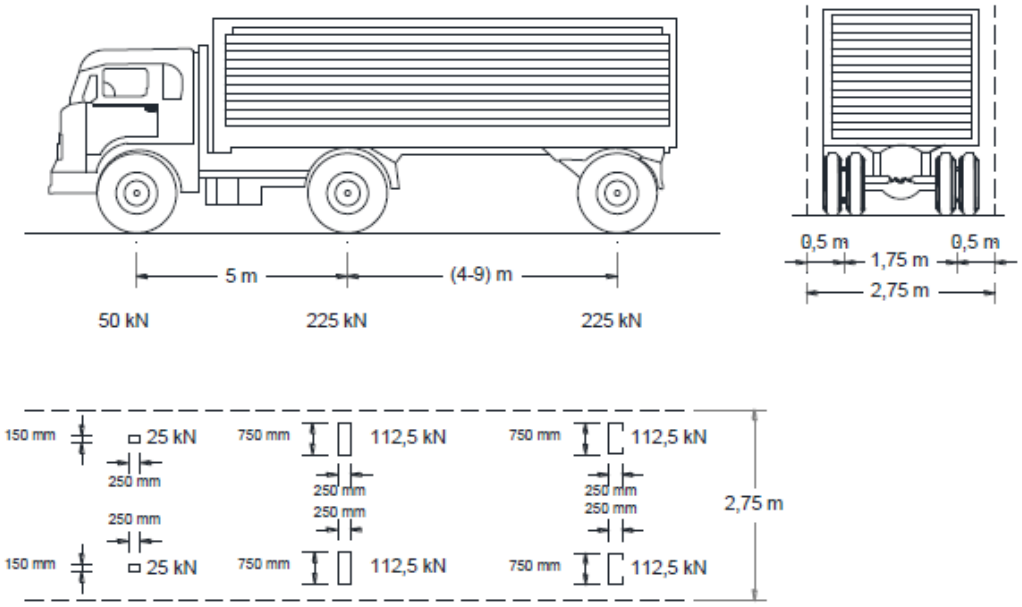
Beban truk "T" tidak diperkenankan digunakan secara bersamaan dengan beban lajur "D". Beban truk ini diterapkan untuk perhitungan pada struktur lantai jembatan. Faktor beban untuk pembebanan "T" ditentukan sesuai dengan ketentuan yang terdapat pada Tabel 3.5 berikut.

Tabel 3. 5 Faktor Beban untuk Beban "T"

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban (γ_{TT})	
	Beton	Keadaan Batas Layan (γ^{S}_{TT})	Keadaan Batas Ultimit (γ^{U}_{TT})
		1	1,8
Transien	Boks gelagar baja	1	2

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Besarnya pembebanan truk "T" dapat dilihat pada Gambar dibawah ini, Dimana terdiri dari truk semitrailer yang pada tiap berat gandarnya sama besar, serta menunjukkan area kontak antar roda dan permukaan lantai.



Gambar 3. 5 Pembebanan Truk "T" (500 kN)

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Gambar diatas menunjukkan beban truk "T" merupakan kendaraan semitrailer dengan konfigurasi dan berat gandar yang seragam. Setiap gandar dibebani dengan dua gaya yang sama besar, yang merepresentasikan kontak roda terhadap permukaan jalan. Jarak antar dua gandar tersebut dapat divariasikan antara 4,0 m – 9,0 meter untuk medapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan (SNI 1725:2016).

3.8.3 Beban Rem (TB)

Penerapan rem oleh kendaraan saat melintasi jembatan menghasilkan beban horizontal yang disebut beban rem. Beban ini sangat signifikan terutama pada kendaraan berat seperti truk. Gaya pengereman yang diberikan oleh roda kendaraan itulah yang ditransfer ke struktur jembatan. Akibatnya, struktur jembatan mengalami tekanan tambahan, terutama pada bagian geladak dan berbagai sambungan yang menghubungkan geladak dengan komponen lain seperti balok penopang dan pilar.

Gaya rem ditetapkan berdasarkan nilai terbesar, yaitu 25% dari berat gandar truk desain atau 5% dari berat truk rencana yang ditambah dengan beban lajur terbagi rata (BTR). Gaya rem ini harus diterapkan pada seluruh lajur rencana yang menerima beban, sesuai ketentuan Pasal 8.2 SNI 1725:2016 mengenai lalu lintas dengan arah yang sama. Dalam perhitungannya, gaya tersebut diasumsikan bekerja secara horizontal pada ketinggian 1800 mm di atas permukaan jalan untuk setiap arah longitudinal, kemudian dipilih nilai yang paling kritis. Selain itu, faktor kepadatan lajur sebagaimana ditetapkan pada Pasal 8.2 SNI 1725:2016 juga berlaku dalam penentuan besarnya gaya rem. Adapun faktor kepadatan lajur dapat dilihat pada Tabel 3.6 Berikut ini.

Tabel 3. 6 Faktor Kepadatan Lajur

Jumlah lajur yang dibebani	Faktor kepadatan lajur
1	1,2
≥2	1

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

3.8.4 Beban Pejalan Kaki (TP)

Apabila seluruh komponen trotoar lebarnya melebihi 600 mm dan dianggap beroperasi bersamaan dengan beban kendaraan pada setiap lajur, maka beban pejalan kaki harus direncanakan dengan kapasitas 5 kPa. Jika trotoar dapat dilalui, tidak perlu mempertimbangkan beban pejalan kaki yang bekerja bersamaan dengan

beban kendaraan. Jika trotoar kemungkinan akan berubah fungsinya dan menjadi jalan masuk di masa depan, beban hidup kendaraan harus diterapkan 250 mm dari tepi bagian dalam pagar pembatas untuk merencanakan elemen jembatan lainnya. Dalam hal ini, faktor beban dinamis tidak perlu dipertimbangkan.

3.8.5 Gaya Akibat Temperatur Seragam (EU_n)

Perubahan suhu yang cukup ekstrim dapat menyebabkan deformasi. Perbedaan antara temperatur minimum atau temperatur maksimum dengan temperatur nominal yang diasumsikan dalam perencanaan harus digunakan untuk menghitung pengaruh akibat deformasi yang terjadi akibat perbedaan suhu tersebut. Adapun temperatur jembatan rata rata nominal dapat dilihat pada tabel 3.7 Berikut ini.

Tabel 3. 7 Temperatur Jembatan Rata – rata Nominal

Tipe bangunan atas	**Temperatur jembatan rata-rata minimum (1)**	**Temperatur jembatan rata-rata maksimum**
Lantai beton di atas gelagar atau boks beton	15℃	40℃
Laitai beton di atas gelagar, boks atau rangka baja	15℃	40℃
Lantai pelat baja di atas gelagar, boks atau rangka baja	15℃	45℃
CATATAN (1) Temperatur jembatan rata-rata minimum bisa dikurangi 5℃ untuk Lokasi yang terletak pada ketinggian lebih besar dari 500 m di atas permukaan laut.		

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Simpangan akibat beban temperatur (Δ_T) harus berdasarkan temperatur maksimum dan minimum yang didefinisikan dalam desain sebagai berikut

$$\Delta T = \mathrm{Al}(T\ \max\ \mathrm{design} - T\ \min\ \mathrm{design})$$

Dimana L merupakan Panjang komponen jembatan (mm) dan α merupakan koefisien mulai temperatur (mm/mm℃). Adapun koefisien muai akibat suhu setiap bahan yang digunakan adalah sebagai berikut

Tabel 3. 8 Temperatur Jembatan Rata-rata Nominal

Bahan	Koefisien Perpanjangan Akibat Suhu (α)	Modulus Elastisitas (MPa)
Baja	12 x 10^{-6} per℃	200000
Beton fc' < 30 fc'> 30	 10 x 10^{-6} per℃ 11 x 10^{-6} per℃	 4700√fc' 4700√fc'

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

3.8.6 Tekanan Angin pada Struktur (EWS)

1. Tekanan Angin Horizontal

Tekanan angin diasumsikan sebagai angin recana dengan kecepatan dasar (Vb) sebesar 90-126 km/jam. Kekuatan angin ini harus diasumsikan terdistribusi secara merata pada area yang terkena angin. Area yang diperhitungkan adalah area dari komponen, termasuk sistem lantai, dan railing. Diambil tegak lurus terhadap arah angin. Arah gaya angin itu harus diubah untuk mencapai pengaruh maksimum terhadap struktur jembatan.

Jembatan yang memiliki elevasi lebih tinggi dari 10000 mm diatas permukaan tanah atau permukaan air, kecepatan angin rencana (V_{DZ}) harus dihitung dengan persamaan berikut.

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

Dimana

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

V_{10} = Kecepatan angin pada elevasi 10000 mm diatas permukaan tanah atau diatas permukaan air rencana (km/jam)

V_B = Kecepatan angin rencana yaitu 90 – 126 km/jam pada elevasi 10000 mm, yang akan menghasilkan tekanan

Z = Elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau permukaan air dimana beban angin dihitung (z > 10000 mm)

V_0 = Kecepatan gesekan angin, yang merupakan karakteristik meteorologi, sebagaimana ditentukan dalam tabel 3.9, untuk berbagai macam tipe permukaan di hulu jembatan (km/jam)

Zo = Panjang gesekan di hulu jembatan, yang merupakan karakteristik meteorologi, ditentukan pada tabel 3.9 (mm)

V_{10} dapat diperoleh dari:

a) Grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang
b) Survei angin pada lokasi jembatan
c) Jika tidak ada data yang lebih baik, perencanaan dapat mengasumsikan bahwa $V_{10}=V_B$=90 s/d 126 km/jam.

Nilai *Vo* dan nilai *Zo* untuk berbagai variasi kondisi permukaan hulu dapat dilihat pada tabel 3.9 Sebagai berikut.

Tabel 3. 9 Nilai V0 dan Z0 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 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Perencanaan diperbolehkan menggunakan kecepatan angin rencana dasar yang berbeda untuk kombinasi pembebanan yang tidak melibatkan pengaruh angin terhadap kendaraan. Arah angin rencana diasumsikan bekerja secara horizontal, kecuali ditentukan lain pada Pasal 9.6.3 SNI 1725:2016. Nilai tekanan angin rencana dalam satuan MPa dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

$$P_D = P_B \left(\frac{V_{DZ}}{V_B}\right)^2 \quad (3.4)$$

Dimana PB adalah tekanan angin dasar. Adapun nilai tekanan angin dasar dapat dilihat pada tabel 3.10

Tabel 3. 10 Tekanan Angin Dasar

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

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Keseluruhan beban gaya angin tidak boleh kurang dari 4,4, N/mm pada bidang tekan dan 2,2 N/mm pada bidang hisap pada struktur rangka dan pelengkung, serta tidak kurang dari 4,4 N/mm pada gelagar.

Untuk beban dari struktur atas, jika angin yang bekerja tidak tegak lurus struktur, maka tekanan angin dasar PB untuk berbagai sudut dapat diambil seperti yang ditentukan dalam tabel 3.11 dibawah ini dan dikerjakan pada tititk berat dari area yang terkena beban angin.

Tabel 3. 11 Tekanan Angin Dasar PB untuk Berbagai Sudut Serang

Sudut Serang	Rangkak, Pilar, Pelengkung		Gelagar	
Derajat	Beban Lateral	Beban Longitudinal	Beban Lateral	Beban Longitudinal
	MPa	MPa	MPa	MPa
0	0,0036	0,0000	0,0024	0,0000
15	0,0034	0,0006	0,0021	0,0003
30	0,0031	0,0013	0,0020	0,0006
45	0,0023	0,0020	0,0016	0,0008
60	0,0011	0,0024	0,0008	0,0009

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Arah sudut angin yang bekerja ditentukan tegak lurus terhadap arah longitudinal serta tekanan angin melintang dan memanjang harus diterapkan bersamaan dalam perencanaan.

Untuk gaya angin yang langsung bekerja pada struktur bawah, harus dihitung berdasarkan tekanan angin dasar sebesar 0,0019 MPa. Pada angin yang bekerja tidak tegak lurus terhadap bangunan bawah maka harus diuraikan menjadi komponen yang bekerja tegak lurus terhadap bidang tepi dan bidang muka dari bangunan bawah. Perencanaan harus menerapkan gaya gaya tersebut bersamaan dengan beban angin yang bekerja pada struktur atas.

2. Tekanan Angin Vertikal

Jembatan harus mampu memikul beban garis memanjang jembatan yang menimbulkan gaya angin vertikal ke atas sebesar 9,6x10-4 MPa dikali dengan lebar jembatan, termasuk barrier dan trotoar. Gaya ini hanya ditinjau untuk keadaan batas kuat III dan daya layan IV yang tidak melibatkan angin pada kendaraan, dan hanya ditinjau untuk kasus pembebanan dimana arah angin dianggap bekerja tegak lurus sumbu memanjang jembatan. Gaya memanjang tersebut mempunyai titik tangkap pada seperempat lebar jembatan dan bekerja secara bersamaan dengan beban angin horizontal.

Setelah tekanan angin didapatkan, beban angin pada struktur (E_{WS}) dapat dilihat dengan persamaan di bawah ini

$$E_{ws} = P_D(H_B + H_{BR})L_B \quad (3.5)$$

Dimana

P_D = tekanan angin rencana

H_B = tinggi struktur jembatan

H_{BR} = tinggi barrier jembatan

L_B = panjang bentang jembatan

3.8.7 Beban Gempa

Dalam perencanaan struktur jembatan, beban gempa merupakan salah satu beban horizontal yang perlu diperhitungkan untuk memastikan kinerja struktur

tetap aman ketika terjadi getaran seismik. Secara teoritis, gaya gempa bekerja sebagai gaya inersia akibat percepatan tanah yang diterima oleh massa struktur.

Pada perencanaan ini beban gempa diperhitungkan sebesar 10% dari beban mati. Salah satu pendekatan praktis yang digunakan dalam perencanaan jembatan adalah mengasumsikan gaya gempa sebesar 10% dari beban mati (0,10 W). Nilai ini berasal dari kisaran koefisien percepatan seismik yang umum terjadi pada struktur dengan periode getar sangat pendek (*short-period structures*), yaitu antara 0,08 hingga 0,12 dari percepatan gravitasi. Dengan demikian, penggunaan nilai 0,10 dianggap berada pada titik tengah yang mewakili kondisi konservatif namun tetap realistis untuk struktur yang relatif kaku dan tidak mengalami amplifikasi respons dinamis yang signifikan.

3.8.8 Kombinasi Beban Rencana

Perencanaan perlu memeriksa masing-masing komponen kombinasi beban, karena setiap beban yang ditentukan dalam kombinasi tersebut harus dikalikan dengan faktor beban yang sesuai. Faktor beban harus dipilih dengan mempertimbangkan kondisi ekstrim akibat beban yang diberikan. Untuk Kombinasi beban yang pengaruh salah satu gaya mengurangi pengaruh gaya yang lain. Jika tidak, faktor beban yang dikurangi harus digunakan sebagai gaya pereduksi. Adapun faktor beban dalam setiap kombinasi dapat dilihat pada Table 3.12 di bawah ini.

Tabel 3. 12 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Keadaan Batas	*MS MA TA PR PL SH*	*TT TD TB TR TP*	*EU*	*EWS*	*EWL*	*BF*	*EUn*	*TG*	*ES*	Gunakan salah satu		
										EQ	*TC*	*TV*
Kuat I	γ_P	1,8	1	-	-	1	0,5/1,2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γ_P	1,4	1	-	-	1	0,5/1,2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	γ_P	-	1	1,4	-	1	0,5/1,2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	γ_P	-	1	-	-	1	0,5/1,2	-	-	-	-	-
Kuat V	γ_P	-	1	0,4	1	1	0,5/1,2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	γ_P	γ_{EQ}	1	-	-	1	-	-	-	1	-	-
Ekstrem II	γ_P	0,5	1	-	-	1	-	γ_{TG}	γ_{ES}	-	1	1
Daya Layan I	1	1	1	0,3	1	1	1/1,2	-	-	-	-	-
Daya Layan II	1	1,3	1	-	-	1	1/1,2	-	-	-	-	-
Daya Layan III	1	0,8	1	-	-	1	1/1,2	γ_{TG}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Layan IV	1	-	1	0,7	-	1	1/1,2	-	1	-	-	-
Fatik (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Sumber : SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan,2016

Catatan : γ_P dapat berupa $\gamma_{MS}, \gamma_{MA}, \gamma_{TA}, \gamma_{PR}, \gamma_{PL}, \gamma_{SH}$ tergantung beban yang ditinjau

γ_{EQ} Adalah faktor beban hidup kondisi gempa.

3.9 Perencanaan Elemen – Elemen Struktur Atas Jembatan

3.9.1 Pelat lantai

Mengacu pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan NO.02/M/BM/2021, ketentuam perencanaan pelat lantai jembatan ditetapkan sebagai berikut.

$$t_s = 0{,}03L \geq 165 \text{ mm} \quad (3.6)$$

Dimana

ts = tebal pelat lantai kendaraan (mm)

L = jarak antar girder (mm)

3.9.2 Balok Girder

Berdasarkan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan N0.02/M/BM/2021 perencanaan dimensi girder adalah sebagai berikut

$$H \geq 0{,}045\ L_b \tag{3.7}$$

$$B = \frac{H}{3} \tag{3.8}$$

Dimana

H = tinggi girder (m)

B = lebar girder (m)

L_b = bentang jembatan (m)

3.9.3 Estimasi Gaya Prategang Serta Luas Tendon yang dibutuhkan

Jumlah strand prategang yang dibutuhkan umumnya ditentukan berdasarkan analisis tegangan tarik pada serat bawah gelagar yang terjadi akibat kombinasi pembebanan daya layan III. Proses ini melibatkan perhitungan tegangan akibat beban layanan, penentuan gaya prategang yang dibutuhkan, dan kemudian menghitung jumlah strand berdasarkan kapasitas gaya dari setiap strand. Hal ini dapat dihitung menggunakan persamaan berikut

$$f_{bserv} = \frac{M_s}{S_b} + \frac{M_A + 0{,}8M_{LL}}{S_{bcg}} \tag{3.9}$$

Dimana

M_S = berat sendiri komponen struktur (N)

S_b = modulus penampang gelagar (mm3)

M_A = beban mati tambahan (N)

M_{LL} = beban lalu litas (N)

S_{bcg} = moduls penampang komposit (mm3)

Tegangan izin saat kondisi beban servis

$$f_{tallowservis} = 0{,}5\sqrt{f'_{cg}} \tag{3.10}$$

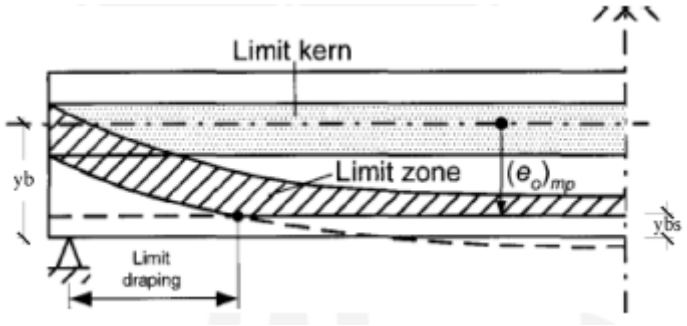
Dimana

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

Besar tegangan pratekan yang dibutuhka (*fpb*) pada bagian bawah adaah sebagai berikut

$$f_{pb} = f_{bserv} - f_{tallowservis} \quad (3.11)$$

Lokasi pusat gaya prategang diasumsikan sekitar 5% - 15% dari tinggi girder yang diukur dari sisi bawah girder (Suseno, 2023). Pusat gaya prategang erat hubungannya dengan lokasi tendon. Desain tendon yang sering dijumpai dapat dilihat pada gambar Berikut ini.



Gambar 3. 6 Eksentrisitas Tendon

Gambar di atas menunjukkan zona batas penempatan tendon pada balok beton prategang. Daerah yang diarsir disebut *limit zone*, yaitu wilayah yang diperbolehkan untuk penempatan tendon agar tegangan yang terjadi pada penampang tetap dalam kondisi aman. Sementara itu, *limit kern* merupakan daerah inti penampang yang ideal untuk gaya prategang agar tidak menimbulkan tegangan tarik pada beton. Bagian *limit draping* menunjukkan batas perubahan kelengkungan tendon, yang umumnya dipasang dengan profil melengkung untuk menahan momen akibat beban luar. Notasi *yb* dan *ybs* menggambarkan jarak ke serat penampang, sedangkan *(θo)mp* menunjukkan eksentrisitas tendon rata-rata yang digunakan dalam perhitungan momen prategang. Dengan demikian, gambar ini menegaskan bahwa tendon harus ditempatkan dalam *limit zone* agar kinerja struktur tetap aman dan sesuai dengan ketentuan perencanaan. Eksentrisitas pada tengah bentang dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$e_c = y_b - y_{bs} \quad (3.12)$$

Dimana

y_b = tinggi garis netral dari serat bawah (mm)

y_{bs} = tinggi pusat tendon tengah bentang dari serat bawah (mm)

Tegangan pada dasar gelagar akibat gaya prategang (Pt) dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$f_{pb} = \frac{P_e}{A_g} + \frac{P_e \, x \, e_c}{S_b} \tag{3.13}$$

Dimana

P_e = gaya prategang diperlukan (N)

e_c = eksentrisitas tendon ditengah bentang (mm)

A_g = luas penampang gelagar (mm^2)

Gaya prategang yang diperlukan dapat dihitung denganpersamaan berikut

$$P_e = \frac{f_{pb} x A_g x S_b}{S_b + e_c x A_g} \tag{3.14}$$

Diasumsikan kehilangan prategang sebesar 25%-30% dan tegangan prategang awal adalah 0,75*fpu*. Untuk perhitungan awal, niali *fpj* yang digunakan adalah nilai *fpbt*, namun jika jumlah strand sudah diketahui, maka perhitungan selanjutnya tetap menggunakan *fpj* sebenarnya.

Gaya prategang akhir di tiap strand

$$P_{pe_{strand}} = A_{strand} x f_{pbt}(1 - losses) \tag{3.15}$$

Jumlah strand yang diperlukan

$$n_{strand_req} = \frac{P_e}{P_{e_{strand}}} \tag{3.16}$$

Perlu diperhatikan bahwa penentuan jumlah awal kawat baja pratekan dapat berbeda dengan jumlah akhir kawat baja pratekan yang digunakan. Hal ini disebabkan kawat baja pratekan awal ditentukan berdasarkan kondisi bentang tengah pada saat desain. Namun pada jembatan gelagar segmental pratekan, desainnya seringkali ditentukan oleh kondisi sambungan, dimana tegangan tarik timbul pada sambungan gelagar, sehingga menghasilkan jumlah kabel pratekan akhir yang lebih besar dari perkiraan awal.

Luas baja pratekan yang digunakan

$$A_{ps} = A_{strand} x \, n_{strand} \tag{3.17}$$

Dimana

A_{ps} = luas baja pratekan (mm2)

A_{strand} = luas strand (mm2)

n_{strand} = jumalah strand

3.9.4 Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang

a. Nilai kehilangan total

Nilai kehilangan total dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini

$$\Delta f_{pi} = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES} \quad (3.18)$$

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pi} + \Delta f_{pLT} \quad (3.19)$$

Dimana

Δf_{pi} = kehilangan saat awal (MPa)

Δf_{pF} = kehilangan akibat friksi (MPa)

Δf_{pA} = kehilangan akibat pengakuran(MPa)

Δf_{pES} = jumlah semua kehilangan akibat perpendekan elastisitas (MPa)

Δf_{pT} = kehilangan prategang total (MPa)

Δf_{pLT} = kehilangan jangka panjang karena rangkak dan susut pada beton (MPa)

b. Gaya prategang kondisi awal

Gaya prategang kondisi awal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini

$$f_{pi} = 0{,}75 f_{pu} - \Delta f_{pi} \quad (3.20)$$

$$Pi = A_{PS}\, x\, f_{Pi} \quad (3.21)$$

Dimana

fpi = tegangan baja prategang pada kondisi awal (MPa)

fpu = kuat tarik baja prategang (MPa)

Pi = gaya prategang kondisi awal

c. Gaya prategang kondisi akhir

Gaya prategang kondisi akhir dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini

$$f_{pe} = 0{,}075 f_{pu} - \Delta f_{Pt} \quad (3.22)$$

$$Pe = A_{PS}\ x\ f_{Pe} \quad (3.23)$$

Dimana

fpe = gaya prategang efektif (MPa)

Pe = gaya prategang kondisi akhir (MPa)

A_{PS} = luas tendon prategang (mm^2)

3.9.5 Kontrol Tegangan Prategang

a. Tegangan izin

Berdasarkan Panduan Praktik Perencanaan Teknis Jemabatan No.2/M/BM/2021, tegangan izin yang disyaratkan adalah sebgaai berikut

Tegangan izin beton kondisi transfer

Tarik $\sigma t_i = 0{,}25\ x\ \sqrt{f_{cig}}$ (3.24)

Tekan $\sigma c_i = -0{,}6\ x\ f_{cig}$ (3.25)

Tegangan izin beton kondisi layan

Tarik $\sigma t_{serv} = 0{,}5\ x\ \sqrt{f_{cig}}$ (3.26)

Tekan $\sigma c_{serv} = -0{,}45\ x\ f_{cig}$ (3.27)

Tegangan izin beton kondisi layan di pelat

Tarik $\sigma t_{serv_s} = 0{,}5\ x\ \sqrt{f_{cig}}\ \sigma c_{serv_s} = -0{,}45\ x\ f_{cig}$ (3.28)

Tekan $\sigma c_{serv_s} = -0{,}45\ x\ f'_{cd}$ (3.29)

b. Tegangan penampang pada saat transfer

Kondisi transfer merupakan tahap awal ketika gaya prategang diberikan pada penampang. Pada kondisi ini, gaya prategang yang bekerja berada pada nilai maksimum, sementara beban luar yang bekerja masih minimum, yaitu hanya berasal dari berat sendiri gelagar. Kondisi ini penting diperhitungkan karena distribusi tegangan yang timbul pada penampang akan sangat dipengaruhi oleh besarnya gaya prategang awal sebelum menerima beban tambahan lainnya.

Tegangan pada serat atas penampang

$$f_{t_i} = -\frac{P_{trans}}{A_g} + \frac{P_{trans} \cdot e_{mid}}{S_t} - \frac{M_{MS_G}}{S_t} \quad (3.30)$$

Tegangan pada serat bawah penampang

$$f_{b_i} = -\frac{P_{trans}}{A_g} + \frac{P_{trans}.e_{mid}}{S_b} - \frac{M_{MS_G}}{S_{tb}} \quad (3.31)$$

Dimana

P_{trans} = gaya prategang saat transfer (MPa)

S_t = modulus penampang serat atas gelagar (mm3)

E_{mid} = eksenrisitas tendon tengah bentang (mm)

c. Tegangan penampang pada masa konstruksi

Pada tahap konstruksi, beban yang bekerja pada gelagar berasal dari beban pelaksanaan, antara lain beban pengecoran pelat, barrier, serta diafragma. Pada kondisi ini, aksi komposit antara gelagar dan pelat jembatan belum terjadi, sehingga seluruh beban tersebut sepenuhnya dipikul oleh gelagar.

Tegangan pada serat atas penampang

$$f_{t_{kos}} = \frac{-P_{trans}}{A_g} + \frac{P_{trans}.e_{mid}}{S_t} + \frac{(-M_{MS_S})+(-M_{MS_G})+(-M_{MS_D})+(-M_{MS_RCP})}{S_t} \quad (3.32)$$

Tegangan pada serat bawah penampang

$$f_{bkos} = \frac{-P_{trans}}{A_g} + \frac{-P_{trans}.e_{mid}}{S_b} + \frac{(M_{MS_S})+(M_{MS_G})(-M_{MS_D})+(M_{MS_RCP})}{S_b} \quad (3.33)$$

d. Tegangan penampang kondisi layan

Pada kondisi layan semua beban rencana sudah bekerja, pada kondisi ini sudah terbentuk aksi komposit antara gelagar dengan pelat. Sehingga beban yang bekerja maksimum sedangkan gaya prategang yang bekerja minimum (sudah terjadi kehilangan prategang janka panjang). Pemeriksaan tegangan dilakukan terhadap kombinasi layan I untuk pengecekan tegangan tekan dan kombinasi layan III untuk pengecekkan tegangan tarik

Tegangan pada serat atas penampang

$$f_{t_serv_I_ps} = \frac{-P_{eff}}{A_g} + \frac{P_{eff}.e_{mid}}{S_t} \quad (3.34)$$

$$f_{t_serv_I_load} = \frac{-M_S}{S_t} + \frac{M_A}{S_{tcg}} - \frac{M_{LL}}{S_{tcg}} - \frac{(M_{AL_{EWL}} + 0{,}3M_{AL_{EWS}})}{S_{tcg}} \quad (3.35)$$

$$f_{t_serv_I_top} = f_{t_serv_I_ps} + f_{t_serv_I_load} \quad (3.36)$$

Tegangan pada serat bawah penampang

$$f_{b_serv_III_ps} = \frac{-P_{eff}}{A_g} + \frac{-P_{eff}.e_{mid}}{S_b} \quad (3.37)$$

$$f_{b_serv_I_load} = \frac{M_S}{S_b} + \frac{M_A}{S_{bcg}} + \frac{0{,}8M_{LL}}{S_{bcg}} \quad (3.38)$$

$$f_{b_serv_III_top} = f_{b_serv_III_ps} + f_{b_serv_III_load} \quad (3.39)$$

Dimana

S_{tcg} = modulus penampang serat atas gelagar komposit (mm^3)

S_{bcg} = modulus penampang serat bawah gelagar komposit (mm^3)

Pada kondisi layan, pelat jembatan menahan beban yang berasal dari barrier, lapisan aspal, serta beban hidup kendaraan. Beban tersebut dipikul oleh penampang komposit hasil transformasi, dimana distribusi tegangan pada penampang dihitung dengan membagi tegangan yang terjadi pada penampang transformasi terhadap nilai rasio transformasi (n). Dengan demikian, perhitungan tegangan pada pelat lantai adalah sebagai berikut

$$n = \frac{E_{cg}}{E_{cd}} \quad (3.40)$$

$$f_{t_s} = \frac{-M_A}{S_{tcd}.n} - \frac{M_{LL}}{S_{tcd},n} - \frac{(M_{AL_EWL} + 0{,}3M_{AL_EWS})}{S_{tcd}.n} \quad (3.41)$$

$$f_{b_s} = \frac{-M_A}{S_{bcd}.n} - \frac{M_{LL}}{S_{bcd}.n} \quad (3.42)$$

Dimana

S_{tcd} = modulus penampang serat atas dek komposit (mm^3)

S_{bcd} = modulus penampang serat bawah dek komposit (mm^3)

3.9.6 Kapasitas Lentur Penampang

Tahanan lentur ditentukan pada saat momen maksimum, yang umumnya terjadi di tengah bentang. Dalam menghitung kekuatan lentur nominal penampang, perlu dipastikan terlebih dahulu apakah penampang berperilaku sebagai penampang persegi empat atau sebagai balok T, sehingga pendekatan perhitungan yang

digunakan sesuai dengan kondisi penampang tersebut. Untuk penampang segi empat, letak sumbu netral penampang adalah sebagai berikut

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

Karena tidak menggunakan baja tulanngan untuk tulangan tarik dan tekan, maka persamaan di atas tereduksi menjadi persamaan di bawah ini

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

Dengan Persamaan letak sumbu netral adalah sebagai berikut

$$C = \frac{A_{ps_tot}.f_{pu}}{\alpha_1.f'_{cg}\beta_1.b+k.A_{ps_tot}\frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (3.45)$$

Tegangan rata-rata tendon prategang

$$f_{ps} = f_{pu}\left(1 - k.\frac{c}{d_p}\right) \quad (3.46)$$

Kapasitas lentur nominal pada tengah penampang

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

Momen tahanan nominal penampang

$$\phi_f = \phi_f.M_n \quad (3.48)$$

Kapasitas lentur penampang diperiksa terhadap momen ultimit akibat kombinasi pembebanan kuat I yang dihitung sebagi berikut

$$M_u = 1{,}2\left(M_{MS_G} + M_{MS_D}\right) + 1{,}3\left(M_{MS_S}M_{MS_{RCP}}\right) + 1{,}4\left(M_{MA_B}M_{MA_A}\right) + 1{,}8M_{LL} \quad (3.49)$$

Cek kapasitas lentur penampang $Mu \leq Mr$

Jika nilai Mr lebih besar dari niali Mu maka penampang mampu memikul beban yang bekerja.

Keterangan

Φf = faktor reduksi

F_{ps} = tegangan rata rata baja prategang (MPa)

A = tinggi tegangan balok persegi ekivalen (mm)

D_p = jarak dari serat tekan terluar ke pusat tulangan prategang (mm)

F_{pu} = kuat tarik putus baja prategang (MPa)

3.9.7 Kapasitas Geser Penampang

Mengacu pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/BM/2021, kapasitas geser penampang dianalisis pada lokasi dengan gaya geser maksimum, yaitu di sekitar tumpuan. Perencanaan geser pada balok prategang dalam pembahasan ini mencakup gelagar nonsegmental maupun segmental. Namun, khusus pada gelagar segmental, metode perhitungan tersebut tidak dapat diterapkan pada daerah sambungan, karena desain geser di area tersebut harus mempertimbangkan kekuatan *shear key* (apabila digunakan) atau kekuatan geser pada sambungan pin (jika menggunakan penghubung tipe pin). Kapasitas geser penampang dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut.

Kontribusi gaya prategang terhadap ketahanan geser,

$$V_p = P_{eff} \times \frac{y_{end} - y_{mid}}{r_{tendon}} \tag{3.50}$$

Gaya geser ultimit di tumpuan, V_{ucr}

Momen kombinasi Kuat I di muka geser kritis tidak boleh kurang dari:

$$M_{ucr} > (V_{ucr} - V_p) \times d_v \tag{3.51}$$

Kuat geser beton,

$$V_c = 0{,}083 \times \beta \times \sqrt{f'_{cg}} \times b_v \times d_v \tag{3.52}$$

Cek apakah diperlukan tulangan geser,

$$V_{ucr} > 0{,}5 \times \phi_v \times (V_c + V_p) \tag{3.53}$$

Gaya geser yang ditahan baja tulangan,

$$V_{s_req} = \frac{V_{ucr}}{\phi_V} - V_C - V_P \tag{3.54}$$

Kekuatan geser tulangan,

$$V_s = \frac{A_v . f_y . d_v . (\cot(\theta))}{S_v} \tag{3.55}$$

Kekuatan geser nominal,

$$V_{n1} = V_c + V_s + V_p \quad (3.56)$$

$$V_{n2} = 0{,}25\ .f'_{cg}.b_v.d_v + V_p \quad (3.57)$$

Kekuatan geser diambil yang lebih kecil.

Cek kapasitas geser,

$$\phi_v.V_n \geq V_{ucr} \quad (3.58)$$

Tegangan geser beton,

$$v_u = \frac{[V_{ucr} - \phi_v.V_p]}{\phi_v.b_v.d_v} \quad (3.59)$$

Cek kapasitas geser,

$$v_u < 0{,}125.f'_{cg} \quad (3.60)$$

Jika vu < 0,125 f'cg, maka syarat jarak maksimum:

$$S_{max} = 0{,}8.d_v \leq 600mm \quad (3.61)$$

Cek spasi digunakan terhadap spasi maksimum,

$$S_v \leq S_{max}$$

Keterangan

d_v	=	kedalaman geser efektif (mm)
b_v	=	lebar efektif (web) badan gelagar (mm)
ϕ_v	=	faktor reduksi geser
V_p	=	tahanan geser oleh gaya prategang (kN)
P_{ef}	=	gaya prategang efektif (kN)
r_{tendon}	=	panjang tendon di setengah bentang
y_{mid}	=	titik berat tendon di tengah bentang (mm)
y_{end}	=	titik berat tendon di tumpuan (mm)

3.9.8 Desain Tulangan *Shear Connector*

Berdasarkan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021 perhitungan tulangan *shear connector* adalah sebagai berikut

Ketahanan geser antar muka

$$\Phi V_{ni} = \Phi_v\left[c_i . A_{cv} + \mu\left(A_{vf} . f_y + P_c\right)\right] \quad (3.62)$$

Cek kapasitas geser

$V_{ui} \leq \Phi V_{ni}$

Keterangan

A_{cv} = luas bidang geser (mm^2)

Ci = faktor kohesi (MPa)

Fy = mutu baja (MPa)

A_{vf} = luas tulangan digunakan (mm^2)

3.9.9 Desain Tulangan Bursting

Menurut Badan Standardisasi Nasional (2004), perencanaan tulangan *bursting* pada balok pratarik maupun pascatarik diperlukan karena adanya konsentrasi tegangan tekan longitudinal yang tinggi di sekitar ujung balok akibat gaya prategang. Pada balok pratarik, gaya prategang ditransfer ke beton secara bertahap sepanjang penampang dekat tumpuan hingga beban terdistribusi merata. Sebaliknya, pada balok pascatarik, transfer beban berlangsung secara langsung di ujung balok melalui pelat tumpu dan angkur, sehingga tidak terjadi proses distribusi bertahap.

Perubahan dari tegangan tekan longitudinal yang terpusat menjadi distribusi linier ini menimbulkan tegangan tarik transversal yang signifikan pada arah vertikal. Apabila tidak diberikan penulangan vertikal, tegangan tersebut berpotensi menyebabkan retak longitudinal pada area angkur, bahkan retakan pada blok ujung. Timbulnya tegangan beton, retak longitudinal, serta fenomena *spalling* atau *bursting* sangat dipengaruhi oleh distribusi gaya terpusat horizontal yang disalurkan tendon prategang melalui pelat tumpu ujung.

Penambahan luas penampang pada ujung gelagar tidak mampu menurunkan tegangan tarik transversal pada beton, sehingga tidak dapat mencegah timbulnya retak *spalling* maupun *bursting*. Oleh karena itu, penggunaan tulangan sengkang serta tulangan longitudinal nonprategang menjadi sangat penting dalam memperkuat daerah transfer beban. Khusus pada balok paskatarik, perkuatan vertikal di belakang plat tumpu dibutuhkan dan dikenal sebagai tulangan *bursting*. Perhitungan lebih lanjut terkait desain tulangan *bursting* pada balok prategang akan dijelaskan pada bagian berikutnya.

Rasio perbandingan lebar pelat angkur untuk sengkang arah vertikal,	r_a	$= {a_1}/{a}$	(3.63)
Rasio perbandingan lebar pelat angkur untuk sengkang arah horizontal,	r_b	$= {b_1}/{b}$	(3.64)
Bursting force untuk sengkang arah vertikal,	P_{bta}	$= 0{,}3\ x\ (1 - r_a) x\ P_j$	(3.65)
Bursting force untuk sengkang arah horizontal,	P_{btb}	$= 0{,}3\ x\ (1 - r_b) x\ P_j$	(3.66)
Luas tulangan sengkang arah vertikal yang diperlukan,	A_{ra}	$= \frac{P_{bta}}{0{,}85\ x\ f_s}$	(3.67)
Luas tulangan sengkang arah horizontal yang diperlukan,	A_{rb}	$= \frac{P_{btb}}{0{,}85\ x\ f_s}$	(3.68)
Tegangan leleh baja sengkang	f_y	$= 420000\ kPa$	(3.69)
Tegangan izin baja sengkang	f_s	$= 0{,}578\ x\ f_y$	(3.70)
Luas penampang sengkang	A_s	$= 2x \frac{\pi}{4} x D^2$	(3.71)
Jumlah sengkang arah vertikal yang diperlukan,	n_a	$= {A_{ra}}/{A_s}$	(3.72)
Jumlah sengkang arah horizontal yang diperlukan,	n_b	$= {A_{rb}}/{A_s}$	(3.73)

Dimana

Pj = Gaya prategang saat jacking

α = Tinggi penampang pelat angkur

b = Lebar penamang Pelat angkur

3.9.10 Kontrol Defleksi Balok Prategang

Berdasarkan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/BM/2021, defleksi pada balok prategang diperhitungkan sebagai hasil dari pengaruh gaya prategang dan beban hidup, namun tidak mencakup defleksi jangka panjang. Adapun langkah perhitungan defleksi balok prategang ditetapkan sebagai berikut.

Defleksi akibat prategang pada saat transfer

$$\Delta_p = \frac{P_{transfer}}{E_{cig}.I_g}\left[\frac{e_{mid}.(L_b)^2}{8} - \frac{(e_{end}-e_{mid})\left(\frac{L_b}{2}\right)^2}{6}\right] \quad (3.74)$$

Defleksi akibat berat sendiri gelagar saat transfer

Deforamasi akibat beban gelagar

$$\Delta_g = \frac{5.W_g.(L_b)^2}{384.E_{cig}.I_g} \quad (3.75)$$

Defkesi akibat berat pelat dan diafragma

$$\Delta_{Dnc} = \frac{5.W_{Dnc}.(L_b)^4}{384.E_{cig}.I_g} \quad (3.76)$$

Defleksi akibat berat mati tambahan

$$\Delta_{Dc} = \frac{5.W_{Dc}.(L_b)^4}{384.E_{cig}.I_g} \quad (3.77)$$

Resume camber

Camber setelah transfer

$$\Delta_{after_trans} = \Delta_p - \Delta_g \quad (3.78)$$

Total defleksi saat konstruksi

$$\Delta_{const} = \Delta_p.f_c - \Delta_g.f_d \quad (3.79)$$

Defleksi akibat beban hidup kendaraan

Deformasi akibat beban BTR penampang komposit

$$\Delta_{BTR} = \frac{5.W_{BTR}.(L_b)^4}{384.E_{cg}.I_{CG}} \quad (3.80)$$

Deformasi akibta beban BGT penampang komposit

$$\Delta_{BGT} = \frac{W_{BGT}.(L_b)^4}{48.E_{cg}.I_{cg}} \quad (3.81)$$

Total deformasi beban hidup

$$\Delta_{LL} = \Delta_{BTR} + \Delta_{BGT} \quad (3.82)$$

Syarat batas defleksi akibat lalu lintas

$$\Delta_{LL_allow} = \frac{L_b}{800} \quad (3.83)$$

Cek terhadap syarat

$$\Delta_{LL} \leq \Delta_{LL_allow}$$

Keterangan:

L_b = panjang bentang

$P_{transfer}$ = gaya prategang saat transfer

E_{cig} = modulus elastis gelagar saat transfer

e_{mid} = eksentrisitas tendon di tengah bentang

e_{end} = eksentrisitas tendon di tumpuan

I_g = inersia gelagar saat transfer

I_{cg} = inersia gelagar saat komposit

3.10 Perencanaan Penulangan Jembatan

3.10.1 Penulangan lentur

Berdasarkan SNI 2847-2019 Perencanaan tulangan lentur dapat dihitung menggunakan persamaan persamaan berikut ini

Momen nominal

$$M_n = \frac{M_u}{\Phi} \quad (3.84)$$

Tinggi efektif (d)

$$d = h - sb - db - 0{,}5dp \quad (3.85)$$

Tahanan lentur (Rn)

$$R_n = \frac{M_n}{b.d} \quad (3.86)$$

Nilai m

$$m = \frac{f_y}{0{,}85 f'_c} \tag{3.87}$$

Rasio tulangan (ρ)

$$\rho_{min} = \frac{1{,}4}{f_y} \tag{3.88}$$

$$\rho_{balance} = \frac{0{,}85 \,.f'_c.\beta 1}{f_y} x \frac{600}{600+f_y} \tag{3.89}$$

$$\rho_{max} = 0{,}75.\rho_{balance} \tag{3.90}$$

$$\rho_{perlu} = \frac{1{,}4}{m} x \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2\ x\ m\ xRn}{f_y}}\right) \tag{3.91}$$

Luas tulangan pokok

$$AS_{perlu} = \rho_{pakai}.b.d \tag{3.92}$$

Jarak tulangan pokok

$$S = \frac{\frac{1}{4}\pi\ x\ dp^2 xb}{AS_{perlu}} \tag{3.93}$$

S<450 mm

Kontrol

$$As_{terpasang} = \frac{\frac{1}{4}\pi\ x\ dp^2 xb}{s} \tag{3.94}$$

$As_{terpasang} > AS_{perlu}$

Tulangan bagi

Luas tulangan bagi yang diperlukan

$AS'_{perlu} = 50\%\ As_{terpasang}$

Jarak tulangan bagi

$$S' = \frac{\frac{1}{4}\pi\ x\ dp^2 xb}{AS'_{perlu}} \tag{3.95}$$

Kontrol

$$As'_{terpasang} = \frac{\frac{1}{4}\pi\ x\ dp^2 xb}{s'} \tag{3.96}$$

$As'_{terpasang} > AS'_{perlu}$

Keterangan

M_u = momen ultimit (kNm)

M_n = momen nominal (kNm)

ρb = rasio tulangan balance

R_n = tahanan momen nominal

ρ = rasio tulangan yang diperlukan

ρ_{max} = rasio tulangan maksimum

ρ_{min} = rasio tulangan minimum

As = luas penampang yang dibutuhkan (mm^2)

b = lebar penampang (mm)

d = selimut beton (mm)

fy = tegangan leleh baja (MPa)

fc' = kuat tekan beton (MPa)

3.10.2 Penulangan geser

Berdasarkan SNI 2847-2019 Perencanaan tulangan geser dapat dihitung menggunakan persamaan persamaan berikut ini

Gaya geser yang mampu ditahan beton

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f'c}\,.\,b.d \quad (3.97)$$

Cek gaya geser yang ditahan beton

$$\Phi V_c = 0{,}75V_c \quad (3.98)$$

$$\Phi V_c > V_u$$

Jarak tulangan geser minimum

Berdasarkan RSNI T-12 (2004) jarak antar sengkang diambil nilai terkecil dari 0,5h atau 300mm

Apabila

$$V_u \leq \varphi.V_n \quad (3.99)$$

Maka

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.100)$$

$$V_s = \frac{V_u}{\varphi} - V_c \quad (3.101)$$

$$V_{s_min} = \frac{b_w.d}{3} \quad (3.102)$$

Keterangan

Vu = beban geser ultimit (Kn)

Vn = beban geser nominal (Kn)

Vc = kuat geser beton (Kn)

Vs = kuat geser tulangan (Kn)

BAB IV
METODELOGI PENELITIAN

4.1 Objek Perencanaan

Jembatan Perning Kloji merupakan salah satu infrastruktur vital yang menghubungkan wilayah kabupaten Mojokerto dengan daerah sekitarnya. Jembatan ini melintasi Sungai Brantas dan menjadi jalur transportasi utama bagi masyarakat setempat, baik aktivitas ekonomi maupun sosial. Lokasi jembatan perning kloji dapat dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini



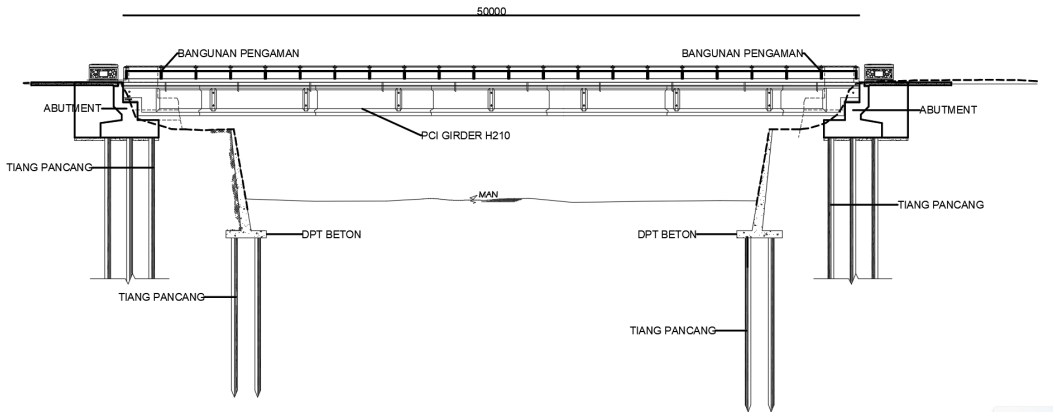
Gambar 4. 1 lokasi jembatan perning kloji
(Sumber:Bina Marga Provinsi Jawa Timur)

4.2 Perumusan Rencana Jembatan

Lagkah peratama yang dilakukan dalam perencanaan jembatan adalah menentukan konsep yang akan diimplementasikan. Unutk menentukan konsep jembatan yang akan digunakan perlu ditinjau dari beberapa kategori. Kategori untuk pemilihan alternatif jembatan dapat dijelaskan sebagai berikut.

4.2.1 Bentang Jembatan

Kondisi eksisting di lapangan seperti sungai, jalan raya, dan lain – lain sangat berkaitan dengan penentuan bentang jembatan yang akan direncanakan. Pada perencanaan ini dilakukan perubahan bentang yang semula jembatan memiliki 3 bentang dengan panjang bentang keseluruhan adalah 46 meter menjadi jembatan dengan 1 bentang dengan panjang bentang 50 meter seperti pada gambar rencana dibawah ini.

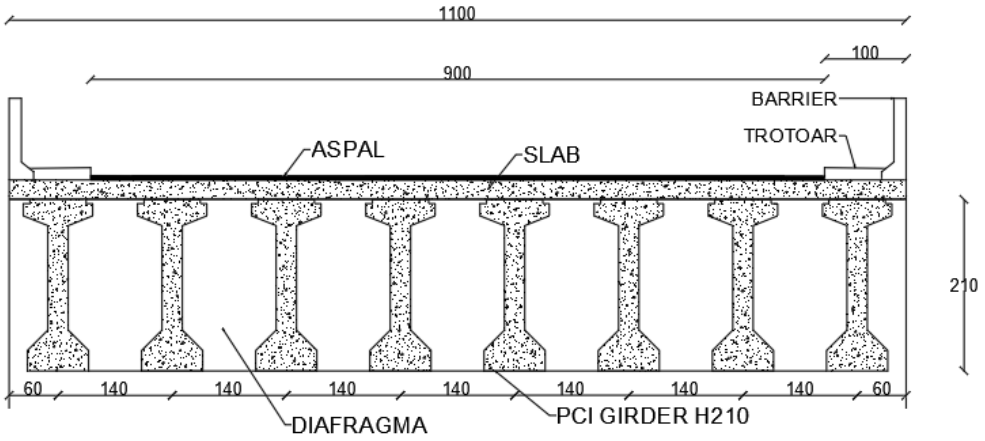


Gambar 4. 2 Potongan Memanjang

Seperti yang terlihat pada gambar diatas panjang bentang keseluruhan adalah 50 meter. Perencanaan ini akan menggunakan gelagar jenis *prestressed concrete I girder*. Gelagar jenis ini akan lebih efektif dibandingkan gelagar dengan beton konvensional yang telah digunkan pada jembatan eksisting.

4.2.2 Lebar Jembatan

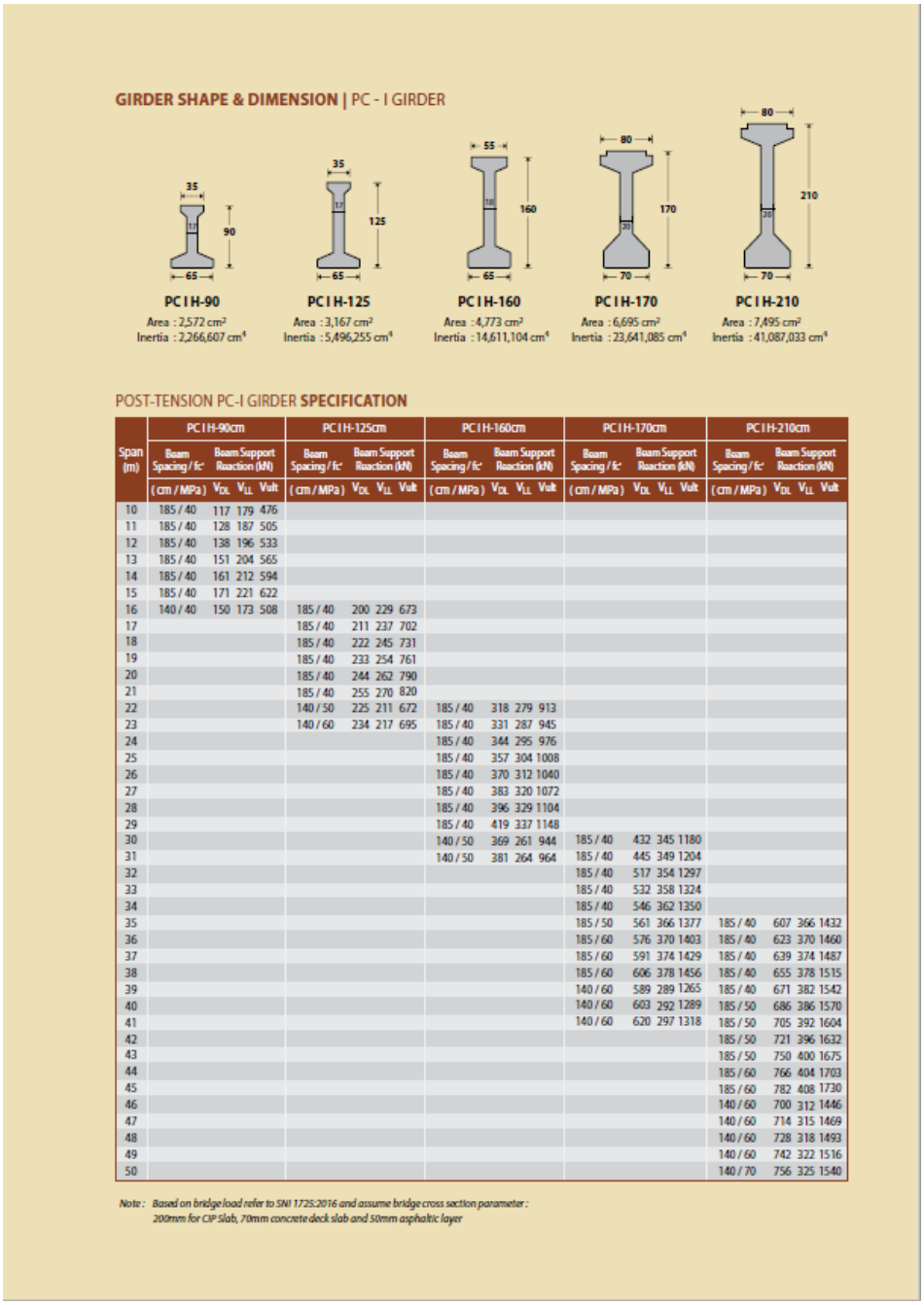
Lebar jembatan ditentukan berdasarkan jarak minimum antara tepi batas jembatan, khususnya pada jembatan tanpa kerb, dan harus menyesuaikan dengan lebar jalan yang dilayani. Untuk jembatan dua lajur, lebar minimum adalah 7 meter sesuai PP No. 34 Tahun 2006. Selain itu, masing-masing sisi jembatan wajib dilengkapi trotoar selebar minimal 1 meter bagi pejalan kaki maupun petugas pemeliharaan, sebagaimana diatur dalam SE Bina Marga 21 Maret 2008. Gambar potongan melintang jembatan yang direncanakan ditunjukkan sebagai berikut.



Gambar 4. 3 Penampang Melintang Rencana Jembatan

4.2.3 Rencana Penampang PCI Girder

Penampang girder yang digunkaan pada perencanaan ini berasal dari PT. Wijaya Karya Beton Tbk. Berdasarkan *bridge product* PT. Wijaya Karya Beton Tbk. Untuk bentang jembatan 50 meter terdapat dua piliha tipe PCI girder yang dapat digunakan, yaitu PCI girder H-210 dan PCI girder H-170 yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut.



GIRDER SHAPE & DIMENSION | PC - I GIRDER

PCI H-90
Area : 2,572 cm²
Inertia : 2,266,607 cm⁴

PCI H-125
Area : 3,167 cm²
Inertia : 5,496,255 cm⁴

PCI H-160
Area : 4,773 cm²
Inertia : 14,611,104 cm⁴

PCI H-170
Area : 6,695 cm²
Inertia : 23,641,085 cm⁴

PCI H-210
Area : 7,495 cm²
Inertia : 41,087,033 cm⁴

POST-TENSION PC-I GIRDER **SPECIFICATION**

Span (m)	PCI H-90cm				PCI H-125cm				PCI H-160cm				PCI H-170cm				PCI H-210cm			
	Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)		
	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	V_{ult}	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	V_{ult}	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	V_{ult}	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	V_{ult}	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	V_{ult}
10	185 / 40	117	179	476																
11	185 / 40	128	187	505																
12	185 / 40	138	196	533																
13	185 / 40	151	204	565																
14	185 / 40	161	212	594																
15	185 / 40	171	221	622																
16	140 / 40	150	173	508	185 / 40	200	229	673												
17					185 / 40	211	237	702												
18					185 / 40	222	245	731												
19					185 / 40	233	254	761												
20					185 / 40	244	262	790												
21					185 / 40	255	270	820												
22					140 / 50	225	211	672	185 / 40	318	279	913								
23					140 / 60	234	217	695	185 / 40	331	287	945								
24									185 / 40	344	295	976								
25									185 / 40	357	304	1008								
26									185 / 40	370	312	1040								
27									185 / 40	383	320	1072								
28									185 / 40	396	329	1104								
29									185 / 40	419	337	1148								
30									140 / 50	369	261	944	185 / 40	432	345	1180				
31									140 / 50	381	264	964	185 / 40	445	349	1204				
32													185 / 40	517	354	1297				
33													185 / 40	532	358	1324				
34													185 / 40	546	362	1350				
35													185 / 50	561	366	1377	185 / 40	607	366	1432
36													185 / 60	576	370	1403	185 / 40	623	370	1460
37													185 / 60	591	374	1429	185 / 40	639	374	1487
38													185 / 60	606	378	1456	185 / 40	655	378	1515
39													140 / 60	589	289	1265	185 / 40	671	382	1542
40													140 / 60	603	292	1289	185 / 50	686	386	1570
41													140 / 60	620	297	1318	185 / 50	705	392	1604
42																	185 / 50	721	396	1632
43																	185 / 50	750	400	1675
44																	185 / 60	766	404	1703
45																	185 / 60	782	408	1730
46																	140 / 60	700	312	1446
47																	140 / 60	714	315	1469
48																	140 / 60	728	318	1493
49																	140 / 60	742	322	1516
50																	140 / 70	756	325	1540

Note : Based on bridge load refer to SNI 1725:2016 and assume bridge cross section parameter : 200mm for CIP Slab, 70mm concrete deck slab and 50mm asphaltic layer

Gambar 4. 4 Katalog PCI Girder PT. Wijaya Karya Beton Tbk.
(Sumber: Bridge Product PT. Wijaya Karya Beton Tbk.)

Pada perencanaan ini, tipe girder yang dipakai adalah *PCI girder* H-210. Untuk bentang 50 m, H-210 lebih cocok karena memberikan kapasitas lentur dan kekakuan yang jauh lebih tinggi, mengurangi lendutan dan risiko retak/keletihan, serta memudahkan pemenuhan kebutuhan tendon prategang dan *development*

length. PCI girder H-170 mungkin hemat material per-unit tetapi cenderung butuh solusi kompensasi (lebih banyak girder/lebih banyak tendon/ketebalan slab lebih besar) yang bisa membuatnya tidak ekonomis dan lebih rumit secara konstruksi untuk bentang sebesar ini. Untuk spesifikasi PCI girder H-210 dapat dilihat pada tabel berikut ini.

Tabel 4. 1 Spesifikasi PCI- Girder H-210

Spesifikasi	
Tipe gelagar	PCI girder H-210
Mutu beton	60 MPa
Panjang bentang	50 m
Panjang gelagar	50,8 m
Spasi antar gelagar	1,4 m
Jumlah gelagar	8
Letak diafragma	0 m, 7 m, 14 m, 21 m, 28 m, 42 m, 50 m

4.3 Metode Perencanaan

Metodologi perencanaan adalah rangkaian langkah dalam proses perhitungan dan perancangan untuk mencapai hasil akhir dalam perencanaan jembatan. Metode perancangan dalam tugas akhir ini dapat dijelaskan melalui tahap metodologi perancangan jembatan yang akan dilaksanakan sebagai berikut.

4.3.1 Studi Literatur

Pada Perencanaan Jembatan Perning Kloji, acuan literatur yang dipakai adalah sebagai berikut.

a. SNI 1725:2016 Standar Pembebanan untuk Jembatan
b. Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021
c. RSNIT-12-2004 Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan
d. SNI 2847-2019

4.3.2 Pengumpulan Data

a. Data Gambar

Berdasarkan data gambar eksisting jembatan perning kloji mempunyai 3 bentang dengan panjang 46 meter dan balok yang digunakan adalah jenis beton konvensional. Pada struktur bawah jembatan ini mempunyai 2 abutmen dan 2 pilar. Jembtan ini akan dimodifikasi dengan menggunakan balok I girder prategang dengan 1 bentang sepanjang 50 meter dan struktur bawah jembatan ini terdiri dari 2 buah abutmen di setiap ujung – ujung jembatan.

b. Data Penyidikan Tanah

Data yang didapatkan dari penyidikan tanah pada area abutmen berupa hasil tes NSPT. Hasil pengujian terlampir pada Lampiran 4.

4.3.3 Analisis Perencanaan Struktr Atas Jembatan

Urutan perencanaan struktur atas jembatan adalah sebagai berikut.

a. Perencanaan Pelat Jembatan

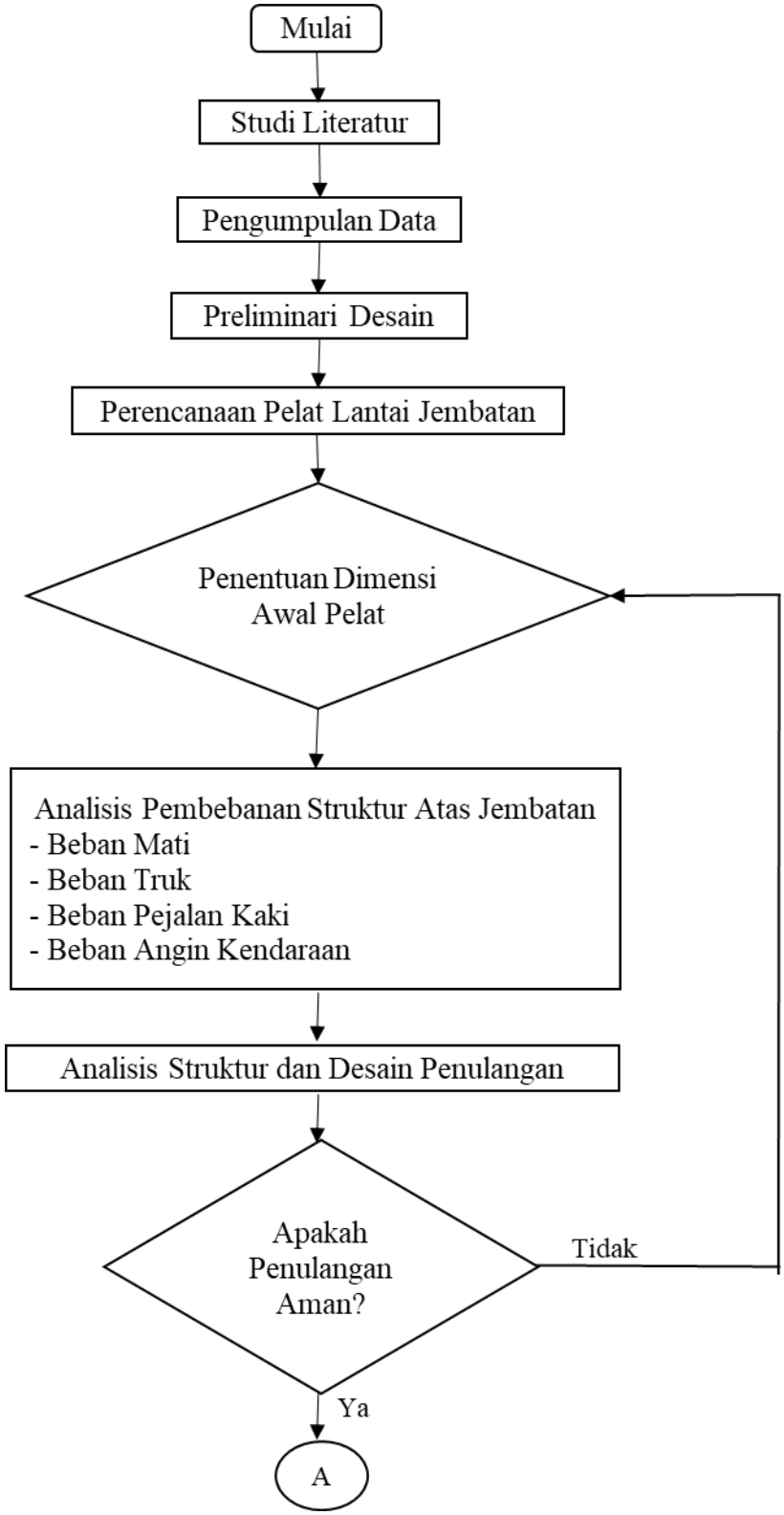
Perencanaan diawali dengan penentuan dimensi pelat jembatan. Tahap berikutnya adalah melakukan analisis terhadap beban-beban yang bekerja. Setelah diperoleh momen akibat beban, proses dilanjutkan dengan perancangan tulangan pelat serta dilengkapi dengan pengecekan untuk memastikan kesesuaian desain tulangan terhadap persyaratan perencanaan..

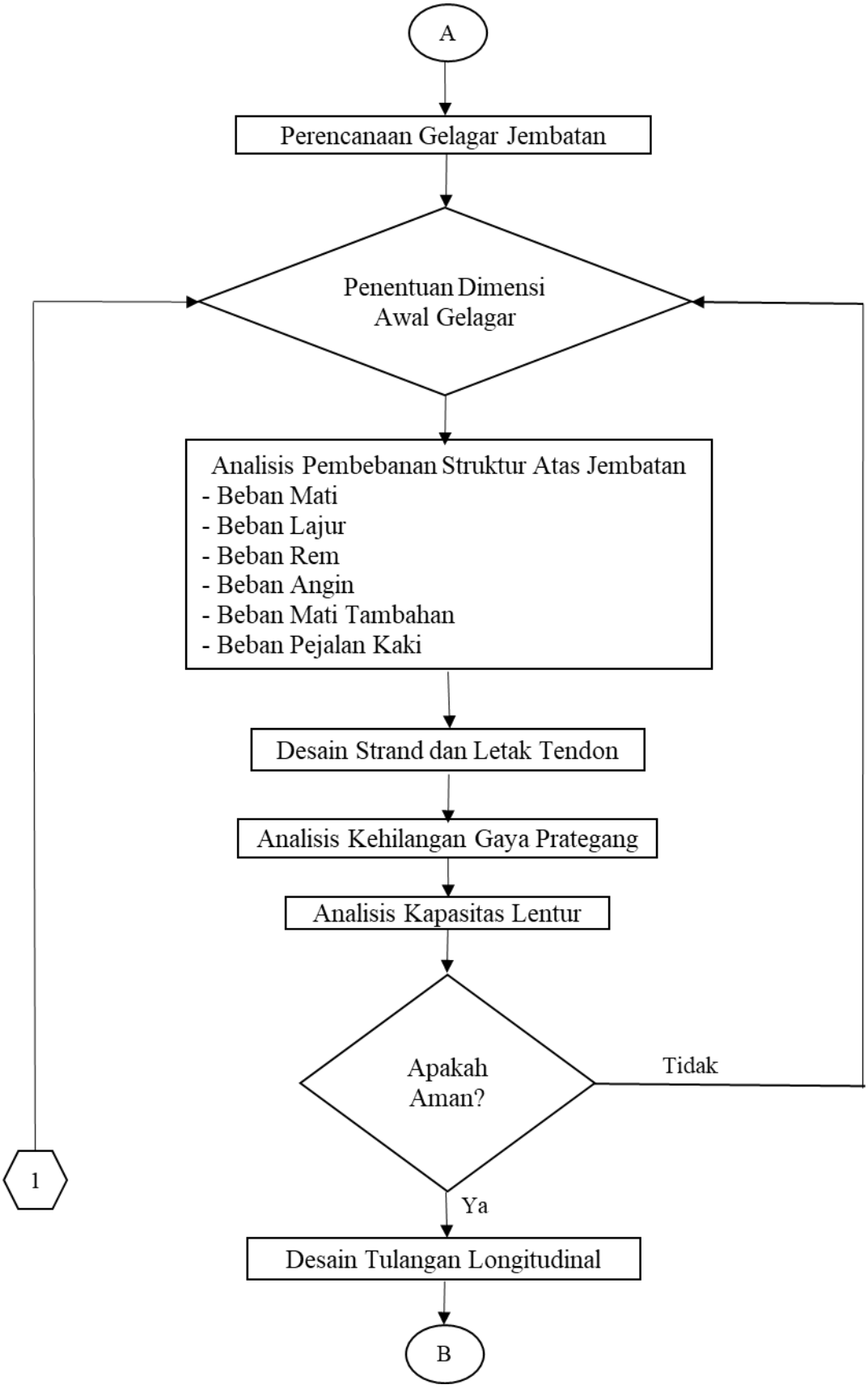
b. Perencanaan Gelagar

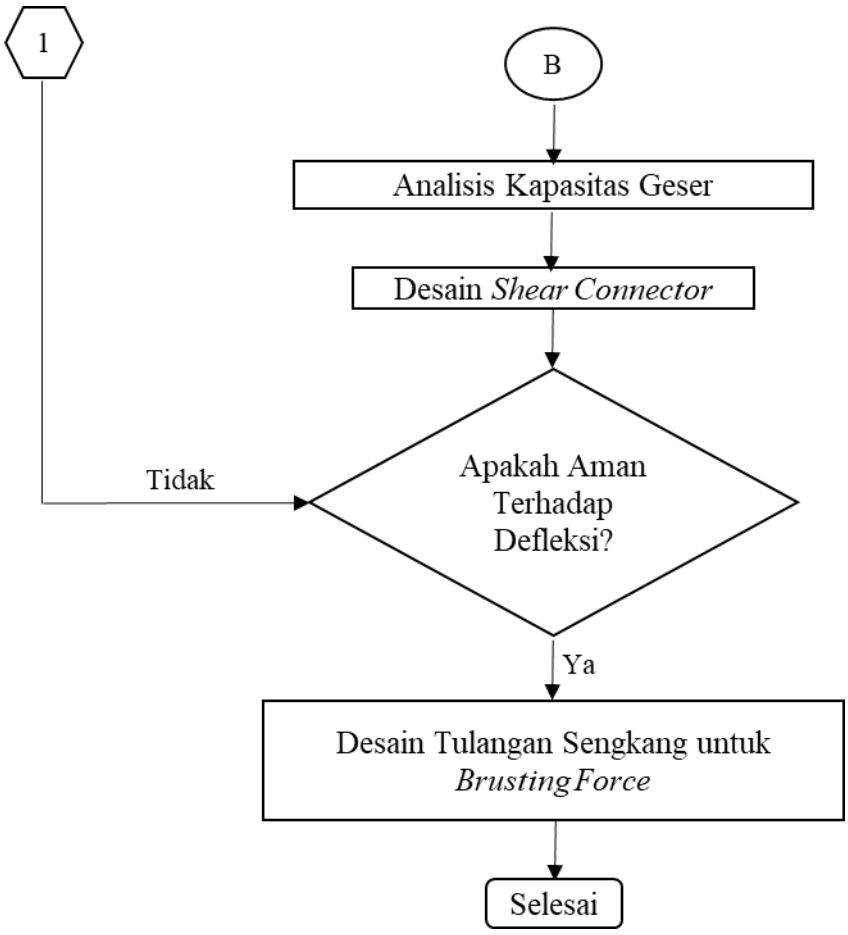
Perencanaan diawali dengan menentukan dimensi penampang gelagar prategang seperti tinggi profil girder, lebar sayap, dan lainnya. Selanjutnya, dilakukan desain gaya prategang yang diperlukan serta penentuan jumlah dan posisi tendon. Tahap berikutnya adalah analisis kehilangan prategang, pengecekan tegangan serat terluar, perhitungan kapasitas lentur, desain tulangan longitudinal, pengecekan kapasitas geser, desain tulangan geser, desain *shear connector*, serta pengecekan keseluruhan desain.

4.3.4 Penyususnan Laporan

Pada tugas akhir ini, perencanaan jembatan Perning Kloji akan disusun dalam bentuk laporan yang sistematis dan terperinci. Laporan tersebut disusun sebagai tugas akhir dengan judul "Perencanaan Struktur Atas Jembatan Perning Kloji di Mojokerto Menggunakan *Prestressed Concrete I Girder*".


Mulai
Studi Literatur
Pengumpulan Data
Preliminari Desain
Perencanaan Pelat Lantai Jembatan
Penentuan Dimensi Awal Pelat
Analisis Pembebanan Struktur Atas Jembatan
- Beban Mati
- Beban Truk
- Beban Pejalan Kaki
- Beban Angin Kendaraan
Analisis Struktur dan Desain Penulangan
Apakah Penulangan Aman?
Tidak
Ya
A


A
Perencanaan Gelagar Jembatan
Penentuan Dimensi Awal Gelagar
Analisis Pembebanan Struktur Atas Jembatan
- Beban Mati
- Beban Lajur
- Beban Rem
- Beban Angin
- Beban Mati Tambahan
- Beban Pejalan Kaki
Desain Strand dan Letak Tendon
Analisis Kehilangan Gaya Prategang
Analisis Kapasitas Lentur
Apakah Aman?
Tidak
Ya
1
Desain Tulangan Longitudinal
B



Gambar 4. 5 Diagram Alir Penelitian

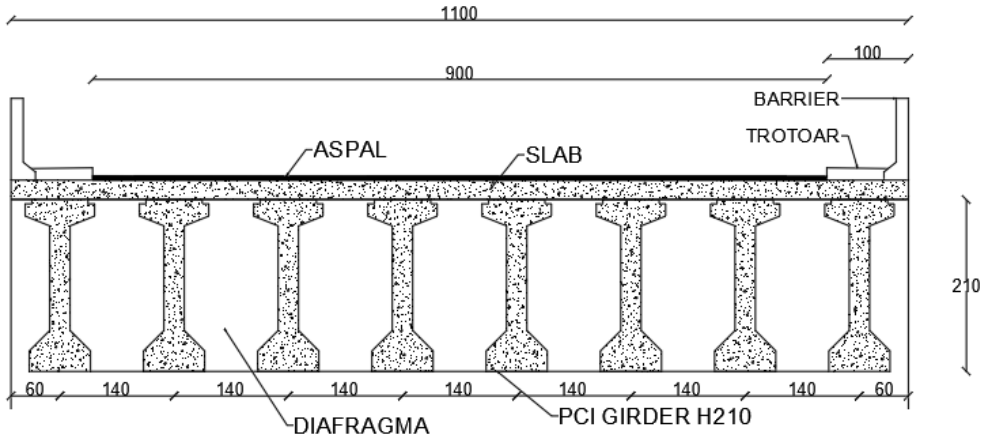
BAB V
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Tinjauan Umum

Analisis pada Jembatan Perning Kloji ini akan mengacu pada Peraturan Standar Pembebanan untuk Jembatan (SNI 1725:2016) dan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021. Perencanaan jembatan Perning Kloji ini akan menggunakan beton prategang tipe *PCI Girder*, yaitu struktur *simple beam.* Analisis ini dibantu dengan program *microsoft excel*.

5.1.1 Data Teknis Jembatan

Data teknis pada Perencanaan Jembatan Perning Kloji dengan Menggunakan *Precast/Prestressed Concrete I Girder* adalah sebagai berikut.



Gambar 5. 1 Penampang Melintang Rencana Jembatan Perning Kloji

Panjang bentang jembatan	L_b	= 50 m
Jarak antar girder	s_g	= 1,4 m
Jumlah balok	n_g	= 8 balok
Lebar trotoar	b_2	= 1 m
Tebal lapis aspal + *ovelay*	t_a	= 0,05 m

Tinggi genangan air t_h = 0,5 m

Tebal trotoar h_{tr} = 0,15 m

5.1.2 Material

Material yang digunakan pada Perencanaan Jembatan Perning Kloji ini adalah sebagai berikut.

1. Beton

Beton yang digunakan pada perencanaan jembatan perning kloji ini terdiri dari beton pracetak dan juga beton bertulang. Berikut ini merupakan uraian komponen beton pada perencanaan jembatan perning kloji.

a. Komponen pra-cetak (K700)

Mutu beton kondisi akhir $f'c$ = 624,4 kg/cm^2

= 61,2 MPa

Mutu beton kondisi awal (saat stressing) fci = 85% x 624,4

= 530,8 kg/cm^2

=52,02 MPa

Tegangan izin awal

Tegangan tekan = 0,6 x $f'ci$

= 0,6 x 530,8

= 31,212 MPa

Tegangan tarik $= -0{,}25 \text{ x } \sqrt{fc}$

$= -0{,}25 \text{ x } \sqrt{61{,}2}$

= -1,956 MPa

Tegangan izin akhir $f'c$ = 624,4 kg/cm^2

Tegangan tekan = 0,45 x $f'c$

= 0,45 x 61,2

= 27,54 MPa

Tegangan tarik $= -0{,}5 \text{ x } \sqrt{fc}$

$= -0{,}5 \text{ x } \sqrt{61{,}2}$

= -3,912 MPa

Modulus elastisitas $Ep = 4700 \text{ x } \sqrt{fc}$

$= 4700 \text{ x } \sqrt{61,2}$

$= 3,678 \text{ x}10^{-4} \text{ kg/cm}^2$

Berat jenis $Wc = 2500 \text{ kg/m}^3$

b. Komponen pelat (K350)

Mutu beton $f'c = 291,1 \text{ kg/cm}^2$

$= 28,6\text{Mpa}$

Tegangan izin akhir

Tegangan tekan $= 0,45 \text{ x } f'c$

$= 0,45 \text{ x } 28,6$

$= 12,87 \text{ Mpa}$

Tegangan tarik $= -0,5 \text{ x } \sqrt{fc}$

$= -0,5 \text{ x } \sqrt{28,6}$

$= -2,674 \text{ Mpa}$

Modulus elastisitas $Ep = 4700 \text{ x } \sqrt{fc}$

$= 4700 \text{ x } \sqrt{28,6}$

$= 2,513 \text{ x}10^{-4} \text{ kg/cm}^2$

Berat jenis $Wc = 2400 \text{ kg/m}^3$

2. Besi tulangan

dimeter $= 13 \text{ mm}$

Mutu besi $fy = 4284 \text{ kg/cm}^2$

$= 420 \text{ MPa}$

Moduus elastisitas $Es = 2040000 \text{ kg/cm}^2$

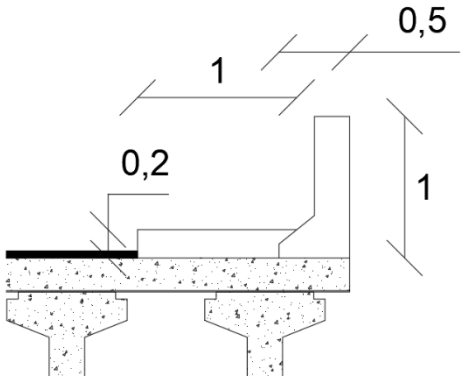
$= 200000 \text{ Mpa}$

Luas $A = 1,33 \text{ cm}^2$

3. Kabel *prestress (uncoated stress relieve sevven wires strand)*

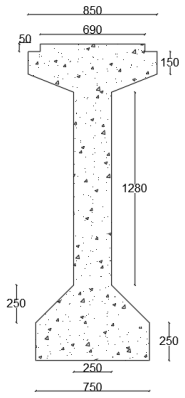
dimeter	*D*	= 15,24 mm
Moduus elastisitas	*Es*	= 1960000 kg/cm^2
Luas penampang efektif	*A*	= 1,4 cm^2
Ultimate tensile strength		= 18960 kg/cm^2
		=1860 MPa

4. Penampang barrier yang digunakan pada perencanaan dapat dilihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5. 2 Penampang Trotoar dan Barrier

5. Balok prategan pada perencanaan ini menggunakan PCI Girder H-210 dari PT. Wijaya Kary Beton dengan dimensi seperti pada Gambar 5.3, untuk berat jenis material yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.1 serta spesifikasi gelagar terlampir pada lampiran 1 dan 2.



Gambar 5. 3 Penampang PCI-Girder H-210

Tabel 5. 1 Berat Jenis Material

Spesific Gravity		kN/m^3
Aspal	γa	22,4
Beton	$\gamma c'$	24
Beton bertulang	γc	25
Beton prategang	γci	25
Genangan air	γw	9,8

Sumber: SNI 1725:2016 Pembebanan Jembatan (2016)

5.2 Perencanaan Pelat Jembatan

5.2.1 Pembebanan Pelat Jembatan

Besar beban yang bekerja pada pelat adalah faktor yang sangat berpengaruh dalam perencanaan pelat jembatan. Adapun beban yang bekerja pada pelat lantai yaitu sebagai berikut.

1. Beban Mati Sendiri (W_S)

   Lebar tinjauan slab lantai jembatan b = 1 m

   Tebal slab lantai jembatan t_s = 0,2 m

   Berat jenis beton bertulang γ_c = 25 kN/m^3

   Beban mati sendiri pelat lantai jembatan $W_s = b \times t_s \times \gamma_c$

   $= 1 \times 0{,}2 \times 25$

   = 5 kN/m

2. Beban mati tambahan (M_A)

   a. Beban merata akibat aspal dan air hujan (W_a)

   Tebal aspal + *overlay* t_a = 0,05 m

   Tinggi genangan air hujan t_h = 0,05 m

   Berat jenis beton bertulang γ_c = 25 kN/m^3

   Berat jenis aspal γ_a = 22 kN/m^3

   Berat jenis air γ_w = 9,8 kN/m^3

   Beban mati tambahan aspal + air hujan $W_a = (t_a \times \gamma_a) + (t_h \times \gamma_w)$

   $= (0{,}05 \times 22) + (0{,}05 \times 9{,}8)$

   = 1,59 kN/m

b. Beban terpusat akibat *barrier* (W_{br})

Berat jenis beton bertulang	γ_c	= 25 kN /m^3
Lebar tinjauan	b	= 1 m
Luas penampang *barrier*	A_b	= 0,3 m
Beban mati tambahan akibat *barrier*	W_{br}	= A_b x b x γ_c
		= 0,3 x 1 x 25
		= 7,5 kN

c. Beban merata akibat trotoar (W_{tr})

Lebar trotoar jembatan	b_{tr}	= 1 m
Tebal trotoar jembatan	h_{tr}	= 0,15 m
Berat jenis beton bertuang	γ_c	= 25 kN/m^3
Beban mati tambahan akibat trotoar	W_{tr}	= b_{tr} x h_{tr} x γ_c
		= 1 x 0,15 x 25
		= 3,75 kN/m

3. Beban lalu lintas truk (P_T)

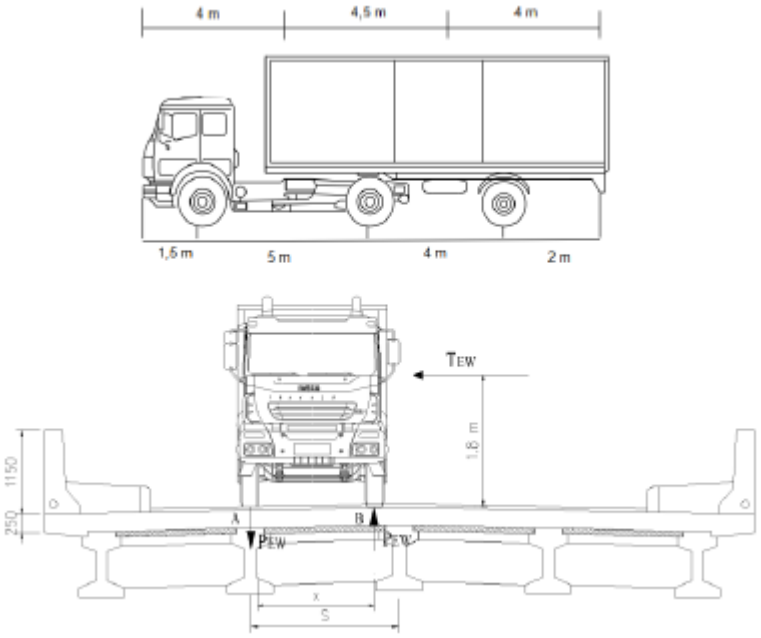
Pada perencanaan pelat lantai jembatan perning kloji ini digunakan beban roda terbesar yaitu beban roda tengah atau roda belakang.

Beban satu roda	P_1	= 112,5 kN
Faktor pembesaran dinamik	FDB	= 0,4
Jarak antar roda	x	= 1,75 m
Beban lalu lintas truk	(P_{T1})	= P_1 x (1+FDB)
		= 112,5 x (1+ 0,4)
		= 157,5 kN

4. Beban angin kendaraan (E_{WL})

Beban angin pada kendaraan diberikan tegak lurus terhadap arah beban kendaraan dan bekerja pada ketinggian 1800 mm di atas permukaan jalan. Tekanan angin tersebut dimodelkan sebagai beban merata sebesar 1,46 kN/m. Pengaruh angin pada kendaraan dapat berupa gaya tekan maupun gaya hisap

(angkat). Ilustrasi pembebanan angin pada kendaraan ditunjukkan pada Gambar 5.4 berikut.



Gambar 5. 4 Pembebanan Angin Kendaraan
(*sumber : SNI 2833:2016 Perencanaan jembatan terhadap beban gempa,2016)*

Tekanan angin kendaraan	E_W	= 1,46 kN
Jarak antar roda	x	= 1,75 m
Tinggi tekanan kendaraan dari permukaan jalan	h	= 1,8 m
Lebar tangkapan angin pada gandar depan	L_{T1}	= 4 m
Lebar tangkapan angin pada gandar tengah	L_{T2}	= 4,5 m
Lebar tangkapan angin pada gandar belakang	L_{T3}	= 4 m
Beban angin yang bekerja pada kendaraan,		
Gandar depan	T_{EW1}	$= E_W x\ L_{T1}$
		= 1,46 x 4
		= 5,84 kN
Gandar tengah	T_{EW2}	$= E_W x\ L_{T2}$
		= 1,46 X 4,5
		= 6,57 kN

Gandar belakang $T_{EW3} = E_W x\ L_{T3}$

$= 1{,}46 \text{ x } 4$

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

Beban angin yang bekerja pada roda diambil dari gandar yang terbesar yaitu gandar tengah $P_{EW} = \frac{T_{EW}\ x\ h}{x}$

$= \frac{6{,}57 \text{ x } 1{,}8}{1{,}75}$

$= 6{,}758 \text{ kN}$

5. Beban pejalan kaki

Beban pejalan kaki

Apabila lebar trotoar yang direncanakan melebihi 600 mm, maka beban pejalan kaki sebesar 5 kPa harus diperhitungkan sepanjang trotoar. Besarnya beban pejalan kaki ditentukan melalui perhitungan sebagai berikut.

Berat pejalan kaki $T_P = 5 \text{ kN/m}^2$

Lebar trotoar $b_{tr} = 1 \text{ m}$

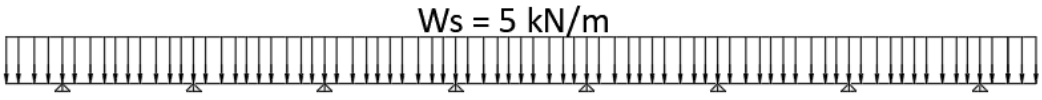
Beban pejalan kaki $W_{TP} = T_P \text{ x } b_{tr}$

$= 5 \text{ x } 1$

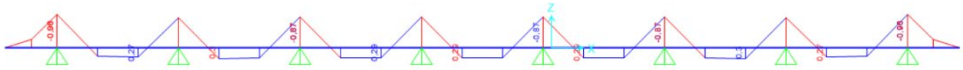
$= 5 \text{ kN/m}$

5.2.2 Permodelan SAP 2000

Unutk mendapatkan nilai momen, beban yang bekerja pada pelat dianalisis menggunakan bantuan program SAP 2000. Pada pemodelan ini, slab yang bertumpu pada girder diasumsikan sebagai tumpuan sendi seluruhnya. Hasil pemodelan dan hasil BMD (*Bending Moment Diagram*) dari masing masing jenis beban dapat dilihat pada gambar gambar berikut ini.



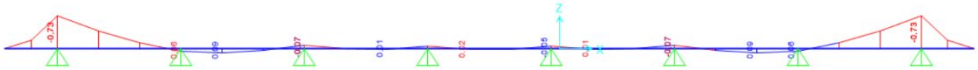
Gambar 5. 5 Pemodelan Beban Mati Sendiri (Ws)



Gambar 5. 6 Bending Momen Diagram Akibat Beban Mati Sendiri (Ws)



Gambar 5. 7 Pemodelan Beban Trotoar (W_{tr})



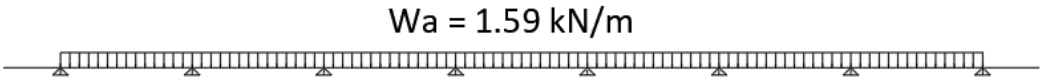
Gambar 5. 8 bending momen diagram akibat beban trotoar (W_{tr})



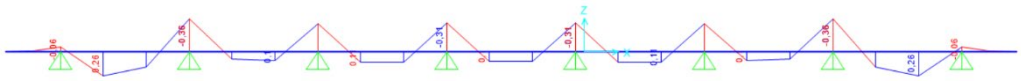
Gambar 5. 9 Pemodelan Beban *Barrier* (W_{br})



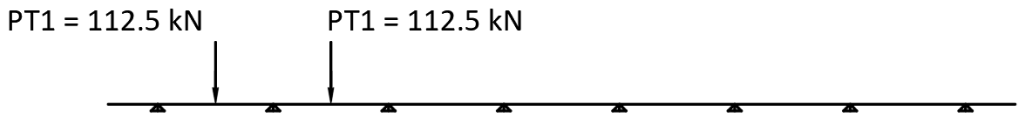
Gambar 5. 10 Bendig Momen Diagram Akibat Beban *Barrier* (W_{br})



Gambar 5. 11 Pemodelan Beban Aspal Dan Air Hujan (Wa)



Gambar 5. 12 Bending Momen Diagram Akibat Aspal Dan Air Hujan (Wa)



Gambar 5. 13 Pemodelan Beban Truk Model-1 (PT-1)



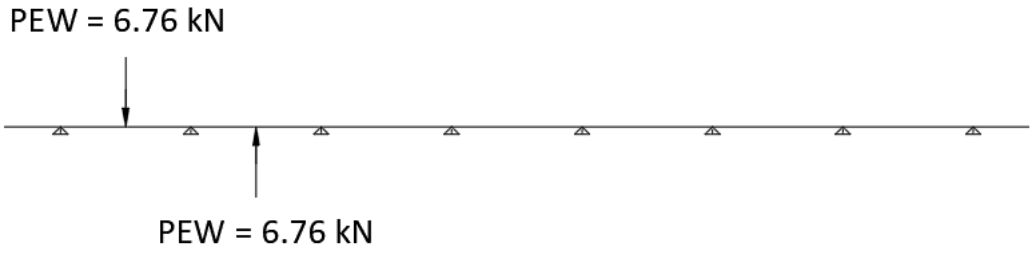
Gambar 5. 14 Bending Momen Diagram Akibat Beban Truk Model-1 (PT-1)



Gambar 5. 15 Pemodelan Beban Truk Model-2 (PT-2)



Gambar 5. 16 Bending Momen Diagram Akibat Beban Truk Model-2 (PT-2)



Gambar 5. 17 Pemodelan Beban Angin Kendaraan (P_{EW})



Gambar 5. 18 Bnding Momen Diagram Akibat Beban Angin Kendaraan (P_{EW})



Gambar 5. 19 Pemodelan Beban Pejalan Kaki (W_{TP})



Gambar 5. 20 Bending Momen Diagram Akibat Beban Pejalan Kaki (W_{TP})

Dari hasil analisis menggunakan program SAP 2000, dapat dilihat nilai momen maksimum yang terjadi akibat beban yang bekerja. Rekapitulasi nilai momen dari masing – masing jenis pembebanan ditampilkan pada Tabel berikut ini.

Tabel 5. 2 Rekaitulasi Momen

No	Jenis Beban	Momen Tumpuan (kNm)	Momen Lapangan (kNm)
1	Berat sendiri (W_S)	0,96	0,3
2	Beban mati tambahan trotoar (W_{tr})	0,73	0,09
3	Beban mati tambahan *barrier* (W_{br})	4,56	0,69
4	Beban mati tambahan aspal+air hujan (W_a)	0,36	0,26
5	Beban truk model 1 (P_{T1})	20,78	29,16
6	Beban truk model 2 (P_{T2})	29,07	40,82
7	Beban angin kendaraan (P_{EW})	0,78	2,19
8	Beban pejalan kaki (W_{TP})	0,96	0,49

Untuk mempermudah pembacaan, digunakan notasi momen sebagai berikut, M_S untuk momen akibat beban sendiri, M_{EW} untuk momen akibat beban angin kendaraan, M_A untuk momen akibat beban mati tambahan (hasil penjumlahan seluruh komponen), dan M_{TT} untuk momen akibat beban truk. Ringkasan momen hasil analisis disajikan pada Tabel 5.3.

Tabel 5. 3 Momen Pakai

No	Jenis Momen	Momen Tumpuan (kNm)	Momen Lapangan (kNm)
1	Momen akibat berat sendiri (M_S)	0,96	0,3
2	Momen akibat berat tambahan (M_A)	5,65	104
3	Momen akibat berat truk (M_{TT})	29,07	40,82
4	Momen akibat berat angin kendaraan (M_{EW})	0,78	2,19
5	Momen akibat berat pejalan kaki (M_{TP})	0,96	0,49

5.2.3 Penentuan Momen Ultimate (M_U)

Setelah momen-momen akibat beban kerja diperoleh, langkah berikutnya adalah menentukan momen ultimate (Mu) sebelum dapat digunakan dalam analisis

penulangan. Penentuan momen ultimate (*Mu*) dilakukan dengan menggunakan kombinasi beban yang sesuai. Mengacu pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/BM/2021, kombinasi Kuat I dapat digunakan untuk perencanaan pelat lantai jembatan. Namun, dalam perancangan kali ini, beberapa kombinasi lain turut dicoba sebagai perbandingan.

Tabel 5. 4 Kombinasi Penentuan Momen Ultimate

No	Jenis Momen	Faktor Beban	Momen Tumpuan (kNm)	Momen Lapangan (kNm)	M_U Tumpuan (kNm)	M_U Lapangan (kNm)
1	M_S	1,3	0,96	0,3	1,248	0,39
2	M_A	2	5,65	1,04	11,3	2,08
3	M_{TT}	1,8	29,07	40,82	52,326	73,476
4	M_{EW}	0	0,78	2,19	0	0
5	M_{TP}	1,8	0,96	0,49	1,728	0,882
Kombinasi Kuat I				**Jumlah**	66,602	76,828
1	M_S	1,3	0,96	0,3	1,248	0,39
2	M_A	2	5,65	1,04	11,3	2,08
3	M_{TT}	1,4	29,07	40,82	40,698	57,148
4	M_{EW}	0	0,78	2,19	0	0
5	M_{TP}	1,4	0,96	0,49	1,344	0,686
Kombinasi Kuat II				**Jumlah**	54,59	60,304
1	M_S	1	0,96	0,3	0,96	0,3
2	M_A	1	5,65	1,04	5,65	1,04
3	M_{TT}	1	29,07	40,82	29,07	40,82
4	M_{EW}	1	0,78	2,19	0,78	2,19
5	M_{TP}	1	0,96	0,49	0,96	0,49
Kombinasi Daya Layan I				**Jumlah**	37,42	44,84
1	M_S	1	0,96	0,3	0,96	0,3
2	M_A	1	5,65	1,04	5,65	1,04
3	M_{TT}	1,3	29,07	40,82	37,791	53,066
4	M_{EW}	0	0,78	2,19	0	0
5	M_{TP}	1,3	0,96	0,49	1,248	0,637
Kombinasi Daya Layan II				**Jumlah**	45,649	55,043

Berdasarkan tabel di atas, terlihat bahwa momen akibat kombinasi Kuat I lebih besar dibandingkan kombinasi lainnya. Oleh karena itu, sesuai dengan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/BM/2021, kombinasi Kuat I digunakan untuk perencanaan pelat karena menghasilkan momen terbesar.

Dari hasil kombinasi Kuat I tersebut, momen ultimate (Mu) di lapangan lebih besar dibandingkan di tumpuan. Dengan demikian, dalam perencanaan tulangan pelat, digunakan nilai Mu lapangan sebesar 76,828 kNm.

5.2.4 Penulangan Pelat Jembatan

Perhitungan penulangan pelat jembtan pada perencanaan ini mengacu pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembtan No.02/M/BM/2021 Pada Sub Bab 2.1.3 Perhitungan Tulangan Pelat Lantai. Berikut langkah – langkah perhitungannya.

1. Tulangan Lentur

Lebar tinjauan pelat	b	= 1000 mm
Tebal pelat	t_s	= 200 mm
Inersia pelat	I	$= \frac{b \; x \; t_s^3}{12}$
		$= \frac{1000 \text{ x } 200^3}{12}$
		$= 666666666{,}7 \text{ mm}^4$
Titik berat penampag	yt	$= \frac{t_s}{2}$
		$= \frac{200}{2}$
		$= 100 \text{ mm}$
Mutu beton	$f'c$	= 28,6 MPa
	$f'c$	≤ 30 MPa
Maka,	β_1	= 0,85
Selimut beton	d'	= 40 mm
Tebal pelat efektif	d_e	$= t_s - d'$
		= 200 – 40
		= 160 mm
Mutu tulangan	fy	= 420 MPa
Momen ultimit	M_U	= 76,828 kNm
Faktor reduksi lentur	Φ_f	= 0,9

Luas tulangan minimum $As_{perlu} = \dfrac{M_U}{\Phi_f x\ fy\ x\ 0{,}85\ x\ d_e}$

$= \dfrac{76{,}828}{0{,}9 \text{ x } 420 \text{ x } 0{,}85 \text{ x } 160}$

$= 1494{,}475 \text{ mm}^2$

Diameter tulangan pokok D = 16 mm

Jarak tulangan perlu $s = \dfrac{\left(\frac{1}{4}\right) x\ D^2 x\ b\ x\ \pi}{As_{perlu}}$

$= \dfrac{\left(\frac{1}{4}\right) \text{x } 16^2 \text{x } 1000 \text{ x } \pi}{1494{,}475}$

= 134,591 mm

Jarak tulangan pakai s = 120 mm

Luas tulangan pakai $As_{pakai} = \dfrac{\left(\frac{1}{4}\right) x\ D^2 x\ b\ x\ \pi}{s}$

$= \dfrac{\left(\frac{1}{4}\right) \text{x } 16^2 \text{x } 1000 \text{ x } \pi}{120}$

= 1676,190 mm^2

Periksa $As_{pakai} \geq As_{perlu}$ (AMAN)

Tinggi blok tekan ekivalen $a = \dfrac{As_{pakai}\ x\ fy}{0{,}85\ x\ f'c\ x\ b}$

$= \dfrac{1676{,}190 \text{ x } 420}{0{,}85 \text{ x } 28{,}6 \text{ x } 1000}$

$= 28{,}959$

Momen nominal $M_n = As_{pakai}\ x\ fy\ x\ \left(d_e - \dfrac{a}{2}\right)$

$= 1676{,}190 \text{ x } 420 \text{ x } \left(160 - \dfrac{28{,}959}{2}\right)$

$= 102{,}446$ kNm

Jarak serat tekan ke sumbu netral $c = a/\beta$

$= \dfrac{28{,}959}{0{,}85}$

$= 34{,}069$

Regangan ultimit beton ε_c = 0,003

Kontrol regangan baja ε_s $= \left(\frac{d_e - c}{c}\right) \geq 0{,}005$

$= \left(\frac{160 - 34{,}069}{34{,}069}\right) \geq 0{,}005$

$= 0{,}01108 \geq 0{,}005$

Karena nilai regangan baja yang terjadi lebih besar dari 0,005, maka penggunaan nila faktor reduksi kekuatan lentur sebesar 0,9 sudah tepat.

Momen tahanan, M_r $= \Phi_f \, x \, M_n$

$= 0{,}9 \text{ x } 102{,}446$

$= 92{,}202$ kNm

Kontrol terhadap syarat

Tulangan yang digunakan harus memenuhi salah satu syarat dibawah ini:

Tegangan retak beton, f_r $= 0{,}6 \text{ x} \sqrt{f'c}$

$= 0{,}6 \text{ x} \sqrt{28{,}6}$

$= 3{,}369$ MPa

Variabel faktor retak lentur $\gamma 1$ = 1,6

Faktor rasio tegangan leleh terhadap tegnagan ultimit baja $\gamma 3$ = 0,75

Momen retak penampang M_{cr} $= \gamma 1 \, x \, \gamma 3 \, x \, f_r \, x(\, I_g \, / \, yt)$

$= 1{,}6 \text{ x } 0{,}75 \text{ x } 3{,}369 \text{x } \left(\frac{666666666{,}7}{100}\right)$

$= 26{,}953$ kNm

Dengan demikian, persyaratan tulangan minimum:

1,33 M_u	1,33 x 76,828	= 102,181 kNm
1,2 M_{cr}	1,2 x 26,953	= 32,344 kNm

Tulangan lentur pelat lantai menggunakan D16-120. Berdasarkan perhitungan, nilai 1,2 Mcr (32,344 kNm) lebih kecil daripada 1,33 *Mu* (102,181 kNm), sehingga digunakan sebagai acuan. Tahanan lentur terfaktor (*Mr* = 92,202 kNm) > 1,2 *Mcr*, sehingga kebutuhan tulangan minimum telah terpenuhi.

2. Tulangan Pembagi

Tulangan pembagi berfungsi sebgai tulangan susut. Tulangan ini searah dengan lajur lalu lintas.

Jarak antar girder s = 1,4 m

$$\frac{110}{\sqrt{s}} \leq 67\%$$

$$\frac{110}{\sqrt{1{,}4}} \leq 67\%$$

$$92{,}97\% \leq 67\%$$

Maka digunakan persentase tulangan 67%

Luas tulangan pakai As = As_{perlu} x 0,67

= 1494,475 x 0,67

= 1001,299 mm^2

Diameter tulangan D = 13 mm

Jarak tulangan perlu s

$$= \frac{(1/4)x\ D^2x\ b\ x\ \pi}{As}$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{4}\right) \text{x } 13^2 \text{x } 1000 \text{ x } \pi}{1001{,}299}$$

= 132,613 mm

Jarak tulangan pakai s = 120 mm

Luas tulangan pakai As_{pakai}

$$= \frac{\left(\frac{1}{4}\right) x\ D^2x\ b\ x\ \pi}{s}$$

$$= \frac{\left(\frac{1}{4}\right) \text{x } 13^2 \text{x } 100 \text{ x } \pi}{120}$$

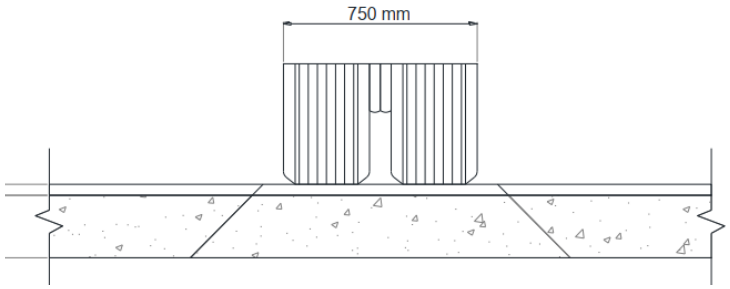
$$= 1106{,}548 \text{ mm}^2$$

periksa $As_{pakai} \geq As_{perlu}$ (AMAN)

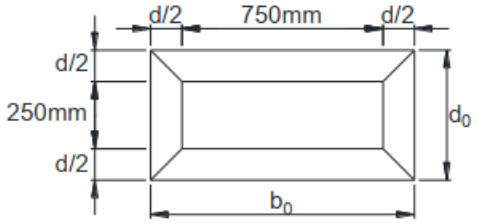
Maka, digunakan tulangan D13-120

3. Geser Pada Pelat Lantai (*Punching Shear*)

Pemeriksaan terhadap geser pelat akibat *punching shear* perlu dilakukan untuk mencegah terjadinya retak akibat beban. Kapasitas pelat lantai terhadap gaya geser harus dihitung berdasarkan bidang kritis, yaitu area kontak antara beban (seperti roda truk) dengan pelat. Bidang kritis ini terletak pada jarak d/2 dari tepi beban, dan ilustrasinya dapat dilihat pada Gambar dibawah ini.



Gambar 5. 21 Bidang Kontak Truk Dengan Pelat Lantai
(sumber: Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/M/2021,2021)



Gambar 5. 22 Punching Shear Pelat Lantai
(sumber: Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/M/2021,2021)

Perhitungan gaya geser pada pelat lantai (*punching shear)* adalah sebagai berikut

Dimensi bidang kontak truk P = 750 mm

L = 250 mm

Tinggi efektif pelat lantai d_e = 160 mm

Dimensi penampang kritis $b_0 = P + d_e$

$= 750 + 160$

$= 910$ mm

$d_0 = L + d_e$

$= 250 + 160$

$= 410$ mm

Rasio panjang terhadap lebar $\beta_c = \frac{b_o}{d_o}$

$= \frac{910}{410}$

$= 2{,}219$

Keliling geser kritis $U = 2\ x\ (b_o + d_o)$

$= 2$ x (910 +410

$= 2640$ mm

Faktor reduksi geser $\phi_v = 0{,}75$

Faktor beban hidup $LF = 1{,}8$

Beban truk $TT = 112{,}5$

Faktor pembesar dinamis $FBD = 0{,}4$

Gaya geser terfaktor $V_u = LF\ x\ (1+FBD)\ x\ TT$

$= 1{,}8$ x (1+ 0,4) x 112,5

$= 283{,}5$ kN

Kuat geser nominal $V_n = \left(0{,}17 + \frac{0{,}33}{\beta_c}\right)\sqrt{f'c}\ xUxd_e$

$= \left(0{,}17 + \frac{0{,}33}{2{,}219}\right)\sqrt{28{,}6}\ x2640x410$

$= 1107{,}648\ kN$

$0{,}33\ x\ \sqrt{f'c}\ x\ U\ x\ d_e$ $= 0{,}33\ x\ \sqrt{28{,}6}\ x\ 2640\ x\ 410$

$= 1146{,}988$ kN

Syarta geser nominal $V_n \leq 0{,}33\ x\ \sqrt{f'c}\ x\ U\ x\ d_e$

Nilai geser pelat yang digunakan $V_n = 1146{,}988$ kN

$V_r = \phi_v\ x\ V_n$

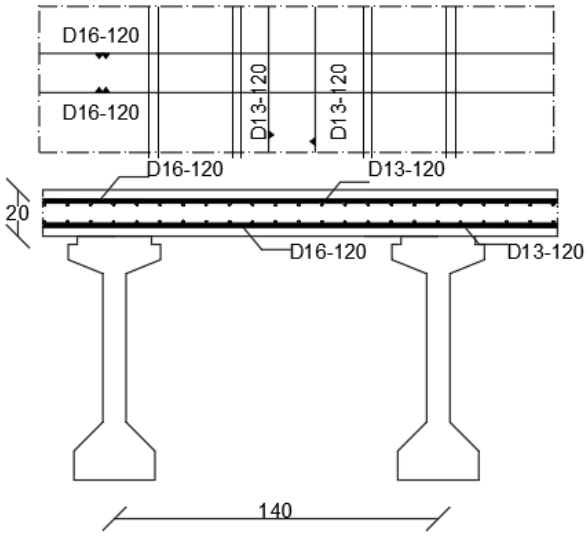
$= 0{,}75$ x 1146,988

$= 830{,}736$ kN

Kontrol terhadap geser yang bekerja $V_u \leq V_r$

$283{,}5 \leq 830{,}736$ (AMAN)

Dengan demikian, pada pelat lantai jembatan digunakan tulangan pokok D16-120 serta tulangan pembagi D13-120.



Gambar 5. 23 Detail Tulangan Pelat Lantai

5.3 Perencanaan PCI-Girder Jembatan

Untuk merancang PCI-Girder, diperlukan data teknis jembatan. Data teknis yang digunakan dalam perencanaan ini dapat dijelaskan sebagai berikut.

1. Gelagar Beton

Kuat tekan beton umur 28 hari f'_{cg} = 61,2 MPa

Kuat tekan beton awal saat transfer f'_{cig} $= 0{,}8 \text{ x } f'_{cg}$

$= 0{,}8 \text{ x } 61{,}2$

$= 48{,}96 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas gelagar saat transfer E_{cig} $= 4700 \text{ x } \sqrt{f'_{cig}}$

$= 4700 \text{ x } \sqrt{48{,}96}$

$= 32886{,}57 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari E_{cg} $= 4700 \text{ x } \sqrt{f'_{cg}}$

$= 4700 \text{ x } \sqrt{61{,}2}$

$= 36768{,}3 \text{ MPa}$

Berat jenis beton γ_c = 25 kN/m^3

2. Pelat Beton

Kuat tekan beton umur 28 hari f'_{cd} = 28,6 MPa

Kuat tekan beton awal saat transfer f'_{cid} $= 0{,}8 \text{ x } f'_{cg}$

$= 0{,}8 \text{ x } 28{,}6$

$= 22{,}88 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas gelagar saat transfer E_{cid} $= 4700 \text{ x } \sqrt{f'_{cig}}$

$= 4700 \text{ x } \sqrt{22{,}88}$

$= 22481{,}53 \text{ MPa}$

Modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari E_{cd} $= 4700 \text{ x } \sqrt{f'_{cg}}$

$= 4700 \text{ x } \sqrt{28{,}6}$

$= 25135{,}11 \text{ MPa}$

3. Baja Prategang

Tipe strand yang digunakan *Uncoated stress relieve seven wire strand*

Diameter strand, D_{ps} = 15,24 mm

Luas penampang strand, A_{strand} = 182,415 mm^2

Tegangan putus baja prategang, f_{pu} = 1860 MPa

Tegangan leleh baja prategang, f_{py} = 1584 MPa

Modulus elastisitas baja prategang, E_{ps} = 197000 MPa

Tegangan di baja prategang sebelum transfer, f_{pbt} = 0,7 x f_{pu}

= 0,7 x 1860

= 1395 MPa

4. Baja Tulangan

Tegangan leleh baja tulangan nonprategang f_y = 420 Mpa

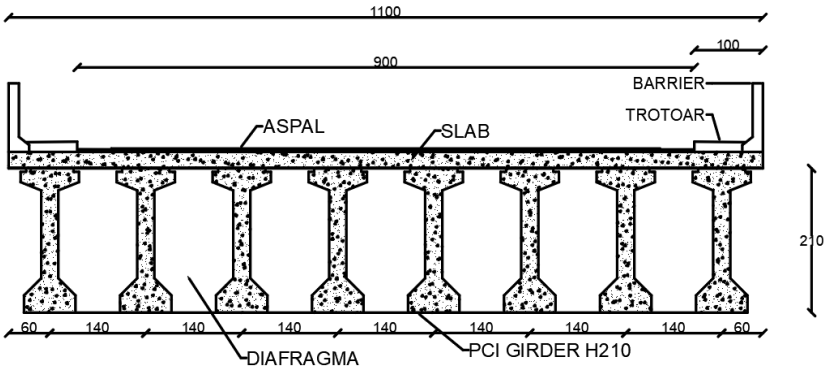
Modulus elastisitas baja tulangan nonprategang E_s = 200000 Mpa

5.3.1 Modulus Penampang PCI Girder

Tinggi awal sistem dek pada jembatan dengan gelagar beton I prategang untuk bentang sederhana diperkirakan sebesar 0,045L_b, dengan L_b sebagai panjang bentang jembatan.

Panjang jembatan	L_b	= 50 m
Tinggi minimum sistem dek	h_d	= 0,045 x L_b
		= 0,045 x 50
		= 2,25 m
		= 2250 mm

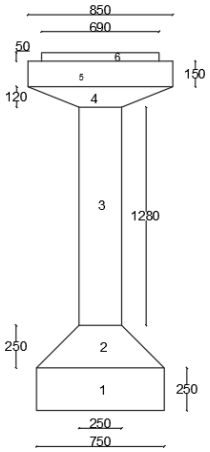
Penentuan jarak antar gelagar serta jumlah gelagar merujuk pada Tabel 3.6.2.2.2b-1 dalam Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan Bagian 3 (2017). Mengingat jembatan ini diklasifikasikan sebagai tipe K (lihat Tabel 3.6.2.2.1-1), maka jarak antar gelagar yang diperkenankan berkisar antara 1100 mm hingga 4900 mm. Oleh karena itu, dalam perencanaan ini digunakan jarak antar gelagar sebesar 1400 mm. Berdasarkan persyaratan yang telah disebutkan, ditetapkan dimensi awal gelagar serta dimensi penampang melintang jembatan sebagai berikut.



Gambar 5. 24 Penampang Melintang Jembatan

Jenis gelagar	Gelagar I prategang 2100 mm	
Jarak antar gelagar	s_g	= 1,4 m
Tebal pelat lantai	t_s	= 0,2 m
Jumlah gelagar digunakan	n_g	= 8
Lebar jalan raya	W_r	= 9 m

1. Data Penampang Dasar Gelagar (Nonkomposit)



Gambar 5.25 Potongan Gelagar Nonkomposit

Tabel 5. 5 Modulus Penampang Gelagar Nonkomposit

Section	Lebar		Tinggi	Luas Penampang	Jarak Terhadap Alas	Statis Momen (Cm^3)	Inersia (Cm^4)	Inersia Momen
	bawah	atas						
	b (cm)		h cm)	A (cm^2)	y	A x y	A x (yi-yb)^2	I0 (cm^4)
1	75	75	25	1875	12,5	23437,5	15509198,89	97656,25
2	75	25	25	1250	35,4	44250	5788194,713	59678,81944
3	25	25	128	3200	114	364800	356290,4161	4369066,667
4	25	85	12	660	185,1	122166	4400232,241	7134,545455
5	85	85	15	1275	196,5	250537,5	11039765,85	23906,25
6	69	69	5	345	205,5	70897,5	3709195,73	718,75
jumlah				8605	749	876088,5	40663660,8	4558161,282

Dari tabel diatas data penampang gelagar non komposit dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

Luas penampang nonkomposit, A_g = 8605 cm^2

Momen inersia gelagar nonkomposit, I_g
$$= \sum I_0 + \sum A\ x\ (y - y_b)^2$$
$$= 4558161{,}282 + 40663660{,}8$$
$$= 45221822{,}1\ \text{cm}^4$$

Tinggi gelagar nonkomposit, h_g = 210 cm

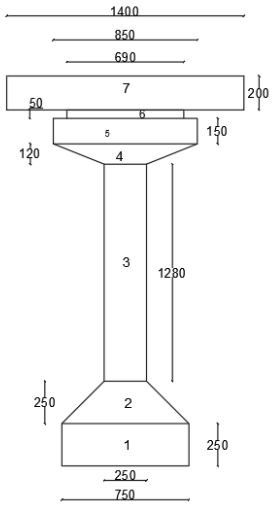
Jarak sumbu netral ke serat terbawah gelagar nonkomposit, y_b
$$= \frac{\sum(A\ x\ yi)}{\sum A}$$
$$= \frac{876088{,}5}{8605}$$
$$= 101{,}812\ \text{cm}$$

Jarak sumbu netral ke serat teratas gelagar nonkomposit, y_t
$$= h_g - y_b$$
$$= 210 - 101{,}812$$
$$= 108{,}188\ \text{cm}$$

Modulus penampang serat bawah gelagar nonkomposit, S_b
$$= \frac{I_g}{y_b}$$
$$= \frac{45221822{,}1}{101{,}812}$$
$$= 444171{,}769\ \text{cm}^3$$

Modulus penampang serat atas gelagar nonkomposit, S_t
$$= \frac{I_g}{y_t}$$
$$= \frac{45221822{,}1}{108{,}188}$$
$$= 417991{,}269\ \text{cm}^3$$

2. Data Penampang Komposit



Gambar 5. 26 Potongan Gelagar Komposit

Tabel 5. 6 Modulus Penampang Gelagar Komposit

Section	Lebar		Tinggi	Luas Penampang	Jarak Terhadap Alas	Statis Momen (Cm^3)	Inersia (Cm4)	Inersia Momen
	bawah	atas						
	b (cm)		h cm)	A (cm^2)	y	A x y	A x $(yi-yb)^2$	I_0 (cm^4)
1	75	75	25	1875	12,5	23437,5	15509198,89	97656,25
2	75	25	25	1250	35,4	44250	5788194,713	59678,81944
3	25	25	128	3200	114	364800	356290,4161	4369066,667
4	25	85	12	660	185,1	122166	4400232,241	7134,545455
5	85	85	15	1275	196,5	250537,5	11039765,85	23906,25
6	69	69	5	345	205,5	70897,5	3709195,73	718,75
7	140	140	20	2800	220	616000	39111818,6	93333,33333
jumlah				11405		1492088,5	79775479,4	4651494,615

Dari tabel diatas data penampang gelagar komposit dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

Rasio modulus elastisitas pelat terhadap gelagar untuk menentukan lebar penampang transformasi adalah:

$$n = \frac{E_{cg}}{E_{cd}}$$
$$= \frac{36768,3}{25135,11}$$
$$= 1,463$$

Lebar penampang sayap transformasi, b_e
$$= \frac{s_g}{n}$$
$$= \frac{140}{1,463}$$
$$= 95,705 \text{ cm}$$

Tinggi total sistem dek komposit, $h_{cg} = h_g + t_s$
$= 210 + 20$
$= 230$ cm

Luas penampang gelagar komposit, $A_{cg} = 11405$ cm^2

Momen inersia gelagar komposit, $I_{cg} = \sum I_0 + \sum A\ x\ (y - y_b)^2$
$= 4651494,615 + 79775479,4$
$= 84426974$ cm^4

Jarak sumbu netral ke serat terbawah gelagar komposit, y_{bcg}
$$= \frac{\sum(A\ x\ yi)}{\sum A}$$
$$= \frac{1492088,5}{11405}$$
$$= 130,828 \text{ cm}$$

Jarak sumbu netral ke serat teratas gelagar komposit, $y_{tcg} = h_g - y_{bcg}$
$= 210 - 130,828$
$= 79,172$ cm

Jarak sumbu netral ke serat teratas pelat dek penampang komposit, $y_{tcd} = h_{cg} - y_{bcg}$
$= 230 - 130,828$
$= 99,172$ cm

Jarak sumbu netral ke serat terbawah pelat dek penampang komposit, $y_{bcd} = h_{cg} - y_{bcg} - t_s$
$= 230 - 130,828 - 20$
$= 79,172$ cm

Modulus penampang atas gelagar komposit, $S_{tcg} = \frac{I_{cg}}{y_{tcg}}$

$= \frac{84426974}{79,172}$

$= 1066368,43 \text{ cm}^3$

Modulus penampang bawah gelagar komposit, $S_{bcg} = \frac{I_{cg}}{y_{bcg}}$

$= \frac{84426974}{130,828}$

$= 645330,112 \text{ cm}^3$

Modulus penampang atas pelat komposit, $S_{tcd} = \frac{I_{cg}}{y_{tcd}}$

$= \frac{84426974}{99,172}$

$= 851315,015 \text{ cm}^3$

Modulus penampang bawah pelat komposit, $S_{bcd} = \frac{I_{cg}}{y_{bcd}}$

$= \frac{84426974}{79,172}$

$= 1066368,43 \text{ cm}^3$

5.3.2 Analisis Pembebanan pada PCI-Girder

1. Perhitungan beban tak terfaktor akibat beban mati struktural dan nonstruktural

   Beban mati struktural

   Tebal pelat t_s = 0,2 m

   Lebar pelat tributari s_g = 1,4 m

   Berat pelat $W_s = s_g x\ t_s x\ \gamma_c$

   = 1,4 x 0,2 x 25

   = 7 Kn/m

   Berat gelagar $W_g = A_g x\ \gamma_c$

   = 87430000 x 25

   = 21,858 kN/m

Luas penampang diafragma tengah A_{dp} $= P_{dp} \, x \, L_{dp}$

$= 1{,}65 \text{ x } 1{,}15$

$= 1{,}8975 \text{ m}^2$

Tebal diafragma tengah t_{dp} $= 0{,}2$ m

Jumlah diafragma tengah n_{dp} $= 7$

Berat diafragma W_{dp} $= A_{dp} \, x \, t_{dp} \, x \, \frac{n_{dp}}{L_b} \, x \, \gamma_c$

$= 1{,}8975 \text{ x } 0{,}2 \text{ x } \frac{7}{50} \text{ x } 25$

$= 1{,}328 \text{ kN/m}$

Berat diafragma diasumsikan terbagi merata di atas gelagar

Beban mati nonstruktural (M_A)

Berat volume aspal γ_a $= 22$ kN /m

Tebal aspal + overlay t_a $= 0{,}05$ m

Berat aspal W_a $= \gamma_a \, x \, t_a \, x \, s_g$

$= 22 \text{ x } 0{,}05 \text{ x } 1{,}4$

$= 1{,}54$ kN /m

Berat volume air γ_w $= 9{,}8$ kN /m

Tebal genangan air hujan t_h $= 0{,}05$ m

Berat genangan air hujan W_h $= \gamma_w \, x \, t_h \, x \, s_g$

$= 9{,}8 \text{ x } 0{,}05 \text{ x } 1{,}4$

$= 0{,}686$ kN /m

Beban *barrier* w_b $= 7{,}5$ kN /m

Jumlah *barrier* n_{br} $= 2$

Jumlah gelagar n_g $= 8$

Berat *barrier* W_{br} $= w_b \, x \, \frac{n_{br}}{n_g}$

$= 7{,}5 \text{ x } \frac{2}{8}$

$= 1{,}875 \text{ kN/m}$

Beban trotoar w_{tr} $= 3{,}75$ kN /m

Jumlah trotoar n_{tr} = 2

Jumlah gelagar n_g = 8

Berat trotoar W_{tr} $= w_{tr}\ x\ \frac{n_{tr}}{n_g}$

$= 3{,}75 \text{ x } \frac{2}{8}$

$= 0{,}9375 \text{ kN/m}$

Momen maksimum akibat M_S dan M_A

Momen akibat berat pelat lantai M_{MS_S} $= \frac{1}{8} \text{ x } W_s\ x\ L_b^2$

$= \frac{1}{8} \text{ x } 7 \text{ x } 50^2$

$= 2187{,}5 \text{ kNm}$

Momen akibat berat gelagar M_{MS_G} $= \frac{1}{8} \text{ x } W_g\ x\ L_b^2$

$= \frac{1}{8} \text{ x } 21{,}5125 \text{ x } 50^2$

$= 6722{,}656 \text{ kNm}$

Momen akibat berat diafragma M_{MS_D} $= \frac{1}{8} \text{ x } W_{dp}\ x\ L_b^2$

$= \frac{1}{8} \text{ x } 13{,}328 \text{ x } 50^2$

$= 415{,}0781 \text{ kNm}$

Momen akibat berat *barrier* M_{MA_B} $= \frac{1}{8} \text{ x } W_{br}\ x\ L_b^2$

$= \frac{1}{8} \text{ x } 1{,}875 \text{ x } 50^2$

$= 585{,}938 \text{ kNm}$

Momen akibat berat trotoar M_{MA_TR} $= \frac{1}{8} \text{ x } W_{tr}\ x\ L_b^2$

$= \frac{1}{8} \text{ x } 0{,}9375 \text{ x } 50^2$

$= 292{,}969 \text{ kNm}$

Momen akibat berat aspal M_{MA_A} $= \frac{1}{8}$ x $W_a\ x\ L_b^2$

$= \frac{1}{8}$ x 1,54x 50^2

$=$ 481,25 kNm

Momen akibat berat air hujan M_{MA_H} $= \frac{1}{8}$ x $W_h\ x\ L_b^2$

$= \frac{1}{8}$ x 0,686 x 50^2

$=$ 214,375 kNm

Gaya geser maksimum akibat M_S dan M_A

Geser akibat berat pelat lantai V_{MS_S} $= \frac{1}{2}$ x $W_s\ x\ L_b$

$= \frac{1}{2}$ x 7x 50

$=$ 175 kN

Geser akibat berat gelagar V_{MS_G} $= \frac{1}{2}$ x $W_g\ x\ L_b$

$= \frac{1}{2}$ x 21,5125 x 50

$=$ 537,812 kN

Geser akibat berat diafragma V_{MS_D} $= \frac{1}{2}$ x $W_{dp}\ x\ L_b$

$= \frac{1}{2}$ x 13,328 x 50

$=$ 33,206 kN

Geser akibat berat *barrier* V_{MA_B} $= \frac{1}{2}$ x $W_{br}\ x\ L_b$

$= \frac{1}{2}$ x 1,875 x 50

$=$ 46,875 kN

Geser akibat berat trotoar $V_{MA_TR} = \frac{1}{2}$ x 0,9375 x 50

$= 23{,}438$ kN

Geser akibat berat aspal $V_{MA_A} = \frac{1}{2}$ x W_a x L_b

$= \frac{1}{2}$ x 1,54 x 50

$= 38{,}5$ kN

Geser akibat berat air hujan $V_{MA_H} = \frac{1}{2}$ x W_h x L_b

$= \frac{1}{2}$ x 0,686 x 50

$= 17{,}15$ kN

2. Perhitungan beban tak terfaktor akibat beban hidup kendaraan

a. Beban D

Pada SNI 1725:2016 tentang pembebanan jembatan, beban lajur D terdiri dari beban merata (BTR) dan beban garis terpusat (BGT). Pada analisis struktur ini, balok dimodelkan sebagai elemen garis, dan lebar tributari pelat lantai ditentukan dari setengah jarak antara gelagar di kiri dan kanan gelagar yang ditinjau. Oleh karena itu, lebar tributari yang digunakan untuk beban BTR dan BGT sebesar 1,4 m.

Beban BTR

Bedasarkan SNI Pembebanan Jembatan Pasal 8.3.1, jika panjang bentang jembatan adalah 50 m, maka besar beban BTR nya adalah sebagai berikut.

Panjang bentang jembatan $L_b = 50$ m

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

$= 9\left(0{,}5 + \frac{15}{50}\right)$

$= 7{,}2$ Kn/m^2

Beban merata permeter BTR $W_{BTR} = q_{BTR}\ x\ s_g$

$= 7{,}2$ x $1{,}4$

$= 10{,}08$ kN/m

Beban BGT

Beban BTR merupakan beban yang didistribusikan secara marata sepanjang bentang jembatan, sedangkan beban BGT adalah beban terpusat yang ditempatkan sedemikian rupa untuk menghasilkan efek maksimum pada struktur. Pada jembatan dengan bentang sederhana, beban BGT umumnya diletakkan di tengah bentang. Berdasarkan Pasal 8.3.1 SNI Pembebanan Jembatan, nilai BGT ditetapkan sebesar 49 kN. Oleh karena itu beban BGT pada balok adalah sebagai berikut

Beban terpusat BGT $P_{BGT} = 49$ x s_g

= 49 x 1,4

= 68,6 kN

Mengacu pada Pasal 8.6 SNI Pembebanan Jembatan 2016, beban garis terpusat (BGT) harus mempertimbangkan pengaruh dinamika kendaraan saat melintas. Oleh karena itu, nilai BGT perlu dikalikan dengan faktor beban dinamis (FBD). Dalam kasus ini, nilai BGT diperbesar 40% dari nilai awalnya untuk mengakomodasi efek dinamis tersebut.

Faktor beban dinamis $FBD = 0{,}4$

Beban merata BGT $W_{BGT} = P_{BGT}\ x\ (1+FBD)$

= 68,6 x (1+0,4)

= 96,04 kN/m

$M_{LL_BTR} = \frac{1}{8}\ x\ W_{BTR}\ x\ l_b^2$

$= \frac{1}{8}$ x $10{,}08$ x 50^2

$= 3150$ kNm

$$M_{LL_BGT} = \frac{1}{8} \text{ x } W_{BGT}\ x\ l_b$$
$$= \frac{1}{8} \text{ x } 96{,}04 \text{ x } 50$$
$$= 1200{,}5 \text{ kNm}$$

Gaya geser tak terfaktor akibat beban D adalah

$$V_{LL_BTR} = \frac{1}{2} \text{ x } W_{BTR}\ x\ l_b$$
$$= \frac{1}{2} \text{ x } 10{,}08 \text{ x}50$$
$$= 252 \text{ kN}$$
$$V_{LL_BGT} = \frac{1}{2} \text{ x } W_{BGT}$$
$$= \frac{1}{2} \text{ x } 96{,}04$$
$$= 48{,}02 \text{ kN}$$

b. Beban Rem (T_B)

Efek pengereman dari kendaraan di jalan raya menghasilkan gaya pada arah memanjang. Gaya ini dianggap bekerja 1,80 meter di atas permukaan jembatan.

Jumlah lajur	n_L	= 2
Jumlah gelagar	n_g	= 8
Lebar jalan raya	b_r	= 9 m
Beban satu truk rencana	P_T	= 500 Kn

Gaya rem yang diambil harus nilai terbesar dari perhitungan berikut

1) 25% dari berat gandar truk desain

Perhitungan ini memanfaatkan gandar belakang karena memiliki berat gandar terbesar, yang menghasilkan pengaruh maksimum.

Berat gandar truk desain W_T = 225 kN

$$TB_1 = 25\% \; x \; \frac{n_L \; x \; w_T}{n_g}$$

$$= 25\% \text{ x } \frac{2 \text{ x } 225}{8}$$

$$= 14{,}0625 \text{ kN}$$

2) 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata BTR

Beban terbagi rata q_{BTR} = 7,2 kN /m^2

Beban BTR yang bekerja disemua lajur

$$P_{BTR} = q_{BTR} \, x \, b_r \, x \, L_b$$

$$= 7{,}2 \text{ x } 9 \text{ x } 50$$

$$= 3240 \text{ kN}$$

$$TB_2 = 5\% \text{ x } (\frac{P_T x n_L + P_{BTR}}{n_g}$$

$$= 5\% \text{ x } \left(\frac{500 \text{ x } 2 + 3240}{8}\right)$$

$$= 26{,}5 \text{ kN}$$

Kondisi dua menghasilkan beban rem sebesar 26,5 kN, yang merupakan nilai penentu. Selanjutnya, momen gaya yang disebabkan oleh beban rem kendaraan dapat dihitung sebagai berikut.

Lengan terhadap garis netral y = 1800 + t_a + y_{tcg}

= 1,8 + 0,05 + 0,791724

= 2,642 m

Beban momen akibat gaya rem W_{TB} = $TB \; x \; y$

= 26,5 x 2,642

= 70,006 kNm

Adapun gaya geser dan momen maksimum akibat beban angin adalah:

$$M_{AL_EWS} = \frac{1}{2} \; x W_{TB}$$

$$= \frac{1}{2} \text{ x } 70{,}006$$

$$= 35{,}003 \text{ kNm}$$

$$V_{AL_EWS} = \frac{W_{TB}}{L_b}$$
$$= \frac{70{,}006}{50}$$
$$= 1{,}4 \text{ kN}$$

3. Perhitungan beban tak terfaktor akibat pejalan kaki (T_P)

Berdasarkan SNI 1725:2016, trotoar dengan lebar lebih dari 600 mm harus diberi beban pejalan kaki sebesar 5 kN/m^2 di sepanjang permukaannya. Data yang dibutuhkan untuk menentukan beban ini adalah sebagai berikut:

Panjang bentang jembatan, L_b = 50 m
Jumlah trotoar n_{tr} = 2
Jumlah galagar n_g = 8
Lebar trotoar b_{tr} = 1 m
Berat pejalan kaki T_P = 5 kN/m^2
Beban pejalan kaki $T_P = T_P x\ b_{tr}\ x\ n_{tr}$
$= 5 \text{ x } 1 \text{ x } 2$
$= 10$ kN/m

Beban pejalan kaki sebesar 10 kN/m diaplikasikan merata sepanjang bentang jembatan pada area trotoar. Jika menggunakan metode analisis pendekatan, beban pejalan kaki ini perlu dibagi rata ke setiap gelagar.

Beban pejalan kaki pada tiap gelgar $W_{TP} = \frac{T_P}{n_g}$
$= \frac{10}{8}$
$= 1{,}25 \text{ kN/m}$

Momen tek terfaktor akibat beban pejalan kaki adalah

$$M_{LL_TP} = \frac{1}{8} x\ W_{TP} x\ (L_b)^2$$
$$= \frac{1}{8} \text{x } 1{,}25 \text{x } (50)^2$$
$$= 390{,}625 \text{ kNm}$$

Gaya geser tak terfaktor akibat beban pejalan kaki adalah

$$V_{LL_TP} = \frac{1}{2}\ x\ W_{TP}\ xL_b$$

$$= \frac{1}{2}\ \text{x}\ 1{,}25\ \text{x}50$$

$$= 31{,}25\ \text{kN}$$

4. Perhitungan beban tak terfaktor akibat beban aksi lingkungan

   a. Beban angin struktur (E_{WS})

      Berdasarkan SNI 1725:2016 pasal 9.6.2, gaya angin vertikal hanya diperhitungkan pada kondisi batas Kuat III dan Layan IV, yang tidak melibatkan pengaruh angin pada kendaraan. Dengan demikian, pada perencanaan jembatan ini gaya angin vertikal diabaikan karena analisis hanya menggunakan kombinasi Kuat I, Layan I, dan Layan III. Perhitungan beban angin struktur memerlukan data elevasi jembatan terhadap permukaan tanah serta kecepatan angin pada elevasi tersebut.

      Perhitungan kecepatan angin rencana pada elevasi rencana menggunakan persamaan berikut ini.

$$V_{DZ} = 2{,}5\ V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_8}\right) ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

      Nilai kecapatan gesekan angin (V_0) Dan panjang gesekan di hulu jembatan (Z_0) dapat dilihat pada Tabel Berikut ini.

Tabel 5. 7 Nilai Kecepatan Gesekan Angin (V0) Dan Panjang Gesekan (Z0)

Kondisi	Lahan terbuka	Sub urban	Kota
V_0	13,2	17,6	19,3
Z_0	70	1000	2500

Sumber: SNI 1725:2016 Pembebanan Jembatan (2016)

Lokasi pembangunan jembatan tergolong dalam daerah sub urban sehingga,

Kecepatan gesekan angin, V_0 = 17,6 kph

Panjang gesekan di hlu jembatan, Z_0 = 1000 mm

Elevasi struktur dari permukaan tanah, Z = 7200 mm

Kecapatan angin rencana, V_b = 126 kph

Kecepatan angin pada elevasi 1000 mm di atas permukaan tanah, V_{10} = 126 kph

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

$$= 2{,}5 \text{ x}17{,}6 \left(\frac{126}{126}\right) \ln\left(\frac{7200}{1000}\right)$$

$$= 86{,}86 \text{ kph}$$

Hitung beban tekanan angin (Pb)

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

Struktur jembatan merupakan gelagar I pratekan maka nilai P_b adalah 0,0024 MPa

Tekanan angin dasar P_b = 0,0024 MPa

Tinggi gelagar h_g = 2,1 m

Tinggi barrier h_{br} = 1 m

Tinggi pelat jembatan h_s = 0,2 m

Tinggi struktur h = 3,3 m

Panjang bentang jembatan L_b = 50 m

$$P_{DH} = P_b \left(\frac{V_{DZ}}{V_B}\right)^2$$

$$= 0{,}0024 \left(\frac{86{,}86}{126}\right)^2$$

$$= 0{,}001141 \text{ MPa}$$

Maka nilai beban angin pada struktur gelagar jembatan adalah sebagai berikut.

Beban angin pada gelagar $E_{WSH} = P_{DH}\ x\ h\ x\ L_b$

= 0,001141 x 3,3 x 50

= 188,1869 kN

Gaya tekan angin per milimeter panjang jembatan $P_H = \frac{E_{WS}}{L_b}$

$= \frac{188,1869}{50}$

$= 3,764\ \text{N/mm}$

Total beban angin tidak boleh kurang dari 4,4 N/mm maka digunakan

P_H = 4,4 N/mm

$E_{WSH} = P_H\ x\ L_b$

= 4,4 x 50

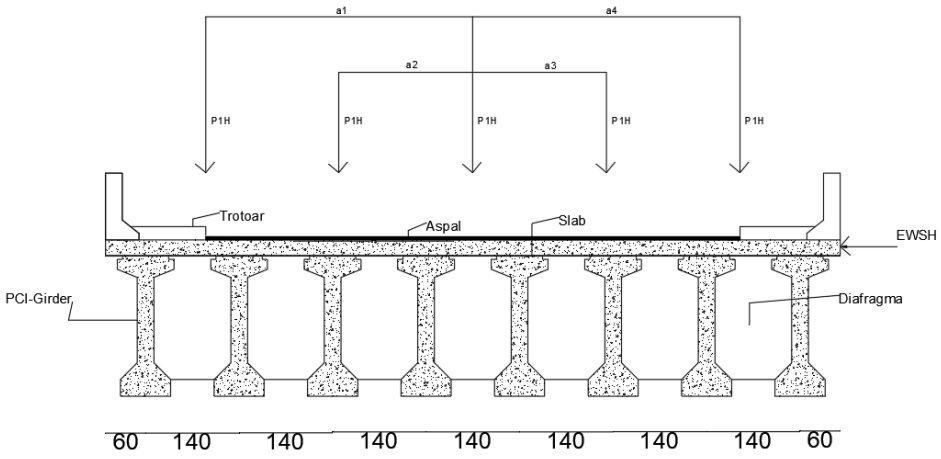
= 220 N/mm

Momen guling akibat gaya angin horizontal M_{EWS_H} = 0,5 x h x E_{WSH}

= 0,5 x 3,3 x 188,1869

= 363 kNm

Beban angin didistribusikan secara memanjang pada girder yang dinotasikan sebagai P_{1H} seperti pada Gambar Beikut.



Gambar 5. 27 Distribusi Beban Angin Struktur (Ews)

Gambar diatas menunjukkan mekanisme distribusi beban angin pada penampang melintang jembatan. Beban angin lateral (E_{WSH}) yang bekerja

pada jembatan dialihkan melalui slab dan diafragma, kemudian didistribusikan ke masing-masing girder dalam bentuk gaya horizontal (P1H). Distribusi beban ini dibagi ke dalam beberapa jalur (a1, a2, a3, a4), sehingga setiap girder memperoleh bagian beban sesuai dengan lebar jalur distribusinya. Untuk gaya angin tekan pada girder dapat ditentukan seperti pada tabel berikut.

Tabel 5. 8 Statis Momen Distribusi Gaya Angin

Pi	ai (m)	ai^2 (m^2)
P1	2,8	7,84
P2	1,4	1,96
P3	1,4	1,96
P4	1,4	1,96
P5	1,4	1,96
P6	1,4	1,96
P7	2,8	7,84
Total		25,48

Nilai gaya angin tekan yang bekerja pada jembatan (P1H) ditentukan pada titik terjauh jembatan atau bernilai maksimum. Dengan menggunakan persamaan berikut, dapat ditentukan nilai gaya angin tekan P_{1H} pada titik terjauh atau bernilai meksimum.

$$P_{1H} = \frac{ai}{\sum ai} \; x \; M_{EWS_H}$$

$$= \frac{2,8}{25,48} \text{ x } 363$$

$$= 39,890 \text{ kN}$$

Maka beban merata angin pada gelagar,

$$W_{EWS} = \frac{P_{1H}}{L_b}$$

$$= \frac{39,89}{50}$$

$$= 0,798 \text{ kN/m}$$

Gaya geser dan momen maksimum akibat beban angin adalah

$M_{AL_EWS} = \frac{1}{8} \text{x } W_{EWS} x\ (L_b)^2$

$= \frac{1}{8} \text{x } 0{,}798 \text{ x } (50)^2$

$= 249{,}3132 \text{ kNm}$

$V_{AL_EWS} = \frac{1}{2} \text{ x } W_{EWS}\ xL_b$

$= \frac{1}{2} \text{ x } 0{,}798 \text{ x}50$

$= 19{,}945 \text{ kN}$

b. Beban angin kendaraan (E_{WL})

Beban angin pada kendaraan diberikan tegak lurus terhadap arah beban kendaraan dan bekerja pada ketinggian 1800 mm di atas permukaan jalan. Tekanan angin tersebut dimodelkan sebagai beban merata sebesar 1,46 kN/m.

Tekanan angin rencana	T_{EWL}	= 1,46 kN/m
Titik tangkap	y	= 1,8 m
Jarak roda	x	= 1,75 m
Panjang bentang jembatan	L_b	= 50 m
Beban angin kendaraan pada girder,	W_{EWL}	$= \frac{T_{EWL}\ x\ y}{x}$
		$= \frac{1{,}46 \text{ x } 1{,}8}{1{,}75}$
		$= 1{,}502 \text{ kN/m}$
Gaya geser akibat beban angin,	M_{AL_EWL}	$= (1/8) x\ W_{EWL} x\ (L_b)^2$
		$= (1/8) \text{x } 1{,}502 \text{ x } (50)^2$
		$= 469{,}2857 \text{ kNm}$
Momen maksimum akibat beban angin,	V_{AL_EWL}	$= (1/2) \text{ x } W_{EWL}\ xL_b$
		$= 1/2 \text{ x } 1{,}502 \text{ x}50$
		$= 37{,}543 \text{ kN}$

5. Beban gempa

Pada perencanaan ini, pengaruh beban gempa diperhitungkan secara sederhana dengan asumsi sebesar 10% dari beban mati. Pendekatan ini digunakan karena lokasi jembatan berada pada zona gempa rendah, sehingga kontribusi beban gempa terhadap gaya internal relatif kecil dibandingkan beban mati dan beban hidup.

Beban mati sendiri Q_{MS} $= W_s + W_g + W_{dp}$

$= 7 + 21{,}513 + 1{,}328$

$= 29{,}841 \text{ kN/m}$

Beban mati tambahan Q_{MA} $= W_a + W_h + W_{br} + W_{tr}$

$= 1{,}54 + 0{,}686 + 1{,}875 + 0{,}938$

$= 5{,}039 \text{ kN/m}$

Total beban mati Q_E $= 10\% \ (Q_{MS} + Q_{MA})$

$= 10\% \ (29{,}841 + 5{,}039)$

$= 3{,}488 \text{ kN/m}$

Panjang jembatan L_b = 50 m

Momen maksimum akibat beban gempa pada gelagar, M_{EQ} $= 1/8 \times Q_E \times (L_b)^2$

$= 1/8 \times 3{,}488 \times 50^2$

$= 1090 \text{ kNm}$

Gaya geser maksimum akibat beban gempa pada gelagar, V_{EQ} $= 1/2 \times Q_E \times L_b$

$= 1/2 \times 3{,}488 \times 50$

$= 87{,}2 \text{ kN}$

Dari perhitungan pembebanan di atas, berikut merupakan rekapitulasi hasil perecanaan PCI girder jembatan.

Tabel 5. 9 Rekapitulasi Perhitungan Berat Sendiri Gelagar (MS)

Jenis Beban Berat Sendiri	Berat	Momen	Geser
	W	M_S	V_S
	(kN/m)	(kNm)	(kN)
Pelat Lantai	7,000	2187,500	175,000
Gelagar	21,513	6722,656	537,813
Diafragma	1,328	415,078	33,206
Total	29,841	9325,234	746,019

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Perhitungan Beban Mati Tambahan Gelagar (MA)

Jenis Beban Mati Tambahan	Berat	Momen	Geser
	W	M_A	V_A
	(kN/m)	(kNm)	(kN)
Lapis Aspal	1,540	481,250	38,500
Air Hujan	0,686	214,375	17,150
Barrier	1,875	585,938	46,875
Trotoar	0,938	292,969	23,438
Total	5,039	1574,531	125,963

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Perhitungan Beban Lalu Lintas Gelagar (LL)

Jenis Beban Lalu Lintas	Berat	Momen	Geser
	W	M_A	V_A
	(kN/m)	(kNm)	(kN)
Beban D		4350,500	300,020
Beban Rem	70,006	35,003	1,400
Beban Pejalan Kaki	1,250	390,625	31,250
Total	71,256	4776,128	332,670

Tabel 5. 12 Rekapitulasi Perhitungan Beban Gempa

Jenis Beban	Berat	Momen	Geser
	W	M_A	V_A
	(kN/m)	(kNm)	(kN)
Beban Gempa	3,488	1090	87,200

Tabel 5. 13 Rekapitulasi Pembebanan

Jenis Pembebanan	Kode Beban	W	P	M	Keterangan
		(kN/m)	(kN)	(kNm)	
Berat Sendiri	*MS*	29,841	-	-	beban merata (W_{MS})
Beban Mati Tambahan	*MA*	5,039	-	-	beban merata (W_{MA})
Beban Lajur D	*TD*	10,08	68,6	-	beban merata (W_{TD}) & beban terpusat (P_{TD})
Gaya Rem	*TB*	-	-	70,006	beban momen (W_{TB})
Pejalan Kaki	*TP*	1,250	-	-	beban merata (W_{TP})
Beban Angin Struktur	*EWS*	0,798	-	-	beban merata (W_{EWS})
Beban Angin Kendaraan	*EWL*	1,502	-	-	beban merata (W_{EWL})
Beban Gempa	*EQ*	3,488	-	-	beban merata (Q_{EQ})

Tabel 5. 14 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Maksimum

Jenis Pembebanan	Kode Beban	Momen Mu (kN/m)	Geser Vu (kN)
Berat Sendiri	*MS*	9325,234	746,019
Beban Mati Tambahan	*MA*	1574,531	125,963
Beban Lajur D	*TD*	4350,500	300,020
Gaya Rem	*TB*	35,003	1,400
Pejalan Kaki	*TP*	390,625	31,250
Beban Angin Struktur	*EWS*	249,313	19,945
Beban Angin Kendaraan	*EWL*	469,286	37,543
Beban Gempa	*EQ*	1090	87,200

6. Kombinasi pembebanan

Dalam perencanaan struktur atas jembatan dengan menggunakan PCI Girder, kombinasi pembebanan berperan penting untuk menentukan kondisi terberat yang mungkin dialami struktur selama umur layannya. Kombinasi pembebanan disusun berdasarkan ketentuan Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021 dan SNI 1725:2016, yang mengatur hubungan antara beban mati, beban hidup, serta beban tambahan lainnya agar perencanaan memenuhi syarat batas ultimit (*ultimate limit state*) dan batas layan (*serviceability limit state*). Pada peneitian ini digunakan tiga kombinasi utama, yaitu Kuat I, Daya Layan I, dan Daya Layan III.

Kombinasi Kuat I digunakan untuk memeriksa kekuatan ultimit struktur, kombinasi ini menghasilkan gaya dalam maksimum yang digunakan untuk mengevaluasi kapasitas lentur dan geser girder agar struktur tidak mengalami keruntuhan. Sementara itu, Daya Layan I digunakan untuk memeriksa tegangan dan lendutan pada kondisi operasi normal, kombinasi ini memastikan bahwa tegangan pada beton maupun tendon pretegang tetap berada di bawah

batas izin sehingga kenyamanan pengguna jembatan terjaga. serta Daya Layan III diterapkan untuk memeriksa kondisi tegangan awal dan potensi retak beton saat gaya prategang diaplikasikan, dengan hanya mempertimbangkan beban mati tanpa beban hidup.

Dari rekapitulasi nilai yang diperoleh pada perencanaan pembebanan sebeumnya, maka diperoleh hasil momen dan gaya geser terfaktor pada masing – masing keadaan batas yang telah direncanakan sebagai berikut.

Tabel 5. 15 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Kuat I

Jenis Momen	Momen	Jenis Gaya Geser	Gaya Geser	Faktor Beban	Mu	Vu
	kNm		kN		kNm	kN
Momen akibat beban pelat	2187,5	Gaya geser akibat beban pelat	175	1,3	2843,75	227,5
Momen akibat beban gelagar	6722,656	Gaya geser akibat beban gelagar	537,812	1,2	8067,188	645,375
Momen akibat beban diafragma	415,0781	Gaya geser akibat beban diafragma	33,206	1,3	539,6016	43,16812
Momen akibat beban barrier	585,9375	Gaya geser akibat beban barrie	46,875	2	1171,875	93,75
Momen akibat beban trotoar	292,968	Gaya geser akibat beban trotoar	23,437	2	585,9375	46,875
Momen akibat beban aspal	481,25	Gaya geser akibat beban aspal	38,5	2	962,5	77
Momen akibat genangan air hujan	214,375	Gaya geser akibat genangan air hujan	17,15	2	428,75	34,3
Momen akibat beban BGT	1200,5	Gaya geser akibat beban BGT	48,02	1,8	2160,9	86,436

Lanjutan Tabel 5. 16 Rekapitulasi Momen & Gaya Geser Kombinasi Kuat I

Jenis Momen	Momen	Jenis Gaya Geser	Gaya Geser	Faktor Beban	Mu	Vu
	kNm		kN		kNm	kN
Momen akibat beban BTR	3150	Gaya geser akibat beba BTR	252	1,8	5670	453,6
Moemen akibat beban rem	35,003	Gaya geser akibat beban rem	1,4	1,8	63,005	2,520
Momen akibat beban pejalan kaki	390,625	Gaya geser akibat beban pejalan kaki	31,25	1,8	703,125	56,25
Momen akibat beban angin	249,313	Gaya geser akibat beban angin	19,945 05	0	0	0
Momen akibat beban angin kendaraan	469,285	Gaya geser akibat beban angin kendaraan	37,542 85714	0	0	0
Jumlah					23196,63	1766,774

Tabel 5. 17 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan I

Jenis Momen	Momen	Jenis Gaya Geser	Gaya Geser	Faktor Beban	Mu	Vu
	kNm		kN		kNm	kN
Momen akibat beban pelat	2187,5	Gaya geser akibat beban pelat	175	1	2187,5	175
Momen akibat beban gelagar	6722,656	Gaya geser akibat beban gelagar	537,81 2	1	6722,656	537,8125
Momen akibat beban diafragma	415,0781	Gaya geser akibat beban diafragma	33,206	1	415,078	33,20625

Lanjutan Tabel 5. 18 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan I

Jenis Momen	Momen	Jenis Gaya Geser	Gaya Geser	Faktor Beban	Mu	Vu
	kNm		kN		kNm	kN
Momen akibat beban barrier	585,9375	Gaya geser akibat beban barrie	46,875	1	585,937	46,875
Momen akibat beban trotoar	292,968	Gaya geser akibat beban trotoar	23,437	1	292,968	23,4375
Momen akibat beban aspal	481,25	Gaya geser akibat beban aspal	38,5	1	481,25	38,5
Momen akibat genangan air hujan	214,375	Gaya geser akibat genangan air hujan	17,15	1	214,375	17,15
Momen akibat beban BGT	1200,5	Gaya geser akibat beban BGT	48,02	1	1200,5	48,02
Momen akibat beban BTR	3150	Gaya geser akibat beba BTR	252	1	3150	252
Moemen akibat beban rem	35,003	Gaya geser akibat beban rem	1,4	1	35,003	1,400113849
Momen akibat beban pejalan kaki	390,625	Gaya geser akibat beban pejalan kaki	31,25	1	390,625	31,25
Momen akibat beban angin	249,313	Gaya geser akibat beban angin	19,94505	0,3	74,793	5,983516484
Momen akibat beban angin kendaraan	469,285	Gaya geser akibat beban angin kendaraan	37,54285714	1	469,285	37,54285714
Jumlah					16219,97	1248,178

Tabel 5. 19 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan III

Jenis Momen	Momen	Jenis Gaya Geser	Gaya Geser	Faktor Beban	Mu	Vu
	kNm		kN		kNm	kN
Momen akibat beban pelat	2187,5	Gaya geser akibat beban pelat	1	2187,5	175	175
Momen akibat beban gelagar	6722,656	Gaya geser akibat beban gelagar	1	6722,656	537,8125	537,8125
Momen akibat beban diafragma	415,0781	Gaya geser akibat beban diafragma	1	415,078	33,20625	33,20625
Momen akibat beban barrier	585,9375	Gaya geser akibat beban barrie	1	585,9375	46,875	46,875
Momen akibat beban trotoar	292,968	Gaya geser akibat beban trotoar	1	292,96875	23,4375	23,4375
Momen akibat beban aspal	481,25	Gaya geser akibat beban aspal	1	481,25	38,5	38,5
Momen akibat genangan air hujan	214,375	Gaya geser akibat genangan air hujan	1	214,375	17,15	17,15
Momen akibat beban BGT	1200,5	Gaya geser akibat beban BGT	0,8	960,4	38,416	48,02
Momen akibat beban BTR	3150	Gaya geser akibat beba BTR	0,8	2520	201,6	252
Moemen akibat beban rem	35,003	Gaya geser akibat beban rem	0,8	28,002	1,120	1,400
Momen akibat beban pejalan kaki	390,625	Gaya geser akibat beban pejalan kaki	0,8	312,5	25	31,25

Lanjutan Tabel 5. 20 Rekapitulasi Momen Dan Gaya Geser Kombinasi Daya Layan III

Jenis Momen	Momen	Jenis Gaya Geser	Gaya Geser	Faktor Beban	Mu	Vu
	kNm		kN		kNm	kN
Momen akibat beban angin	249,313	Gaya geser akibat beban angin	0	0	0	5,983
Momen akibat beban angin kendaraan	469,285	Gaya geser akibat beban angin kendaraan	0	0	0	37,542
Jumlah					14720,67	1138,117

5.3.3 Analisis Kebutuhan Tendon

1. Perkiraan gaya prategang dan luas tendon yang diperlukan

Dalam perhitungan, kebutuhan kawat baja prategang bergantung pada tegangan tarik yang muncul di serat bawah gelagar. Tegangan tersebut dianalisis ketika gelagar menahan kombinasi beban Layan III. Adapun nilai tegangan tarik yang diperoleh dari kondisi tersebut adalah sebagai berikut:

$$f_{bserv} = \frac{(M_{MSS}+M_{MSD}+M_{MSG})y_b}{I_g} + \frac{(M_{MAA}+M_{MAB}+M_{MAH})y_{bcg}}{I_{cg}} + \frac{0{,}8M_{LL}xy_{bcg}}{I_{cg}}$$

$$= \frac{(2187{,}5+415{,}1+6722{,}656)1{,}03}{4{,}522} + \frac{(481{,}25+585{,}94+214{,}375)1{,}32}{8{,}443} + \frac{0{,}8\text{x }4776\text{ x}1{,}32}{8{,}443}$$

$$= 28901{,}409$$

$$= 28{,}901 \text{ MPa}$$

Tegangan izin saat kondisi beban servis, $f_{tallowservice}$

$$f_{tallowservice} = 0{,}5\sqrt{f'_{cg}}$$

$$= 0{,}5\sqrt{61{,}2}$$

$$= 3{,}911 \text{ MPa}$$

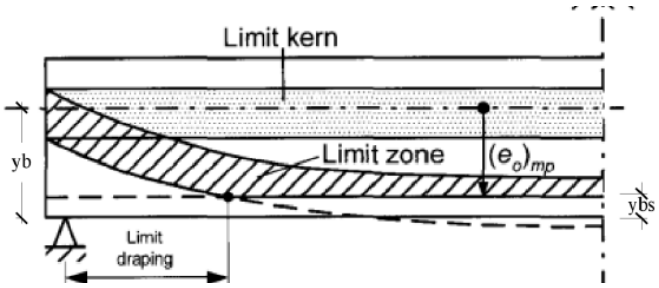
Maka besar tegangan pratekan yang dibutuhkan, f_{pb}, pada bagian bawah gelagar adalah:

$$f_{pb} = f_{bserv} - f_{tallowservice}$$

$$= 28{,}901 - 3{,}911$$

$$= 24{,}990 \text{ MPa}$$

Titik pusat gaya prategang umumnya ditempatkan pada 5% hingga 15% dari tinggi gelagar, diukur dari sisi bawahnya. Penempatan ini menghasilkan eksentrisitas, yaitu jarak antara pusat tendon dengan sumbu netral gelagar. Untuk kasus ini, eksentrisitas yang dipilih adalah 5%.



Gambar 5. 28 Eksentrisitas Lokasi Pusat Prategang
(Sumber: Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021,2021)

Berikut ini data yang diperlukan untuk menentukan kebutuhan luas tendon prategang.

Jarak pusat penampang tendo Prategang ke sisi terbawah gelagar, $y_{bs} = 0{,}05\ x\ h_g$

$= 0{,}05 \text{ x } 2100$

$= 105 \text{ mm}$

Eksentrisitas pada tengah bentang, $e_c = y_b - y_{bs}$

$= 1018{,}116 - 105$

$= 913{,}116 \text{ mm}$

Tegangan pada dasar gelagar akibat gaya prategang (Pt), ditentukan dengan persamaan berikut

$$f_{pb} = \frac{P_e}{A_g} + \frac{P_e x e_c}{S_b}$$

Gaya prategang yang diperlukan, $Pe = \frac{f_{pb} x A_g x S_b}{S_b + e_c x A_g}$

$$= \frac{24{,}990\text{x}874300\text{x}451272629}{451272629 + 913{,}116\text{x}874300}\text{x}10^{-3}$$

$$= 7765{,}932 \text{ kN}$$

Diasumsikan bahwa kehilangan prategang mencapai 25%. Dengan tegangan prategang awal sebesar $0{,}75f_{pu}$, prategang efektif yang dihasilkan menjadi 50%. Pada tahap perhitungan awal, nilai f_{pj} (tegangan prategang setelah kehilangan) diasumsikan sama dengan f_{pbt}. Namun, setelah jumlah *strand* (kawat) ditentukan, nilai f_{pj} yang sebenarnya akan digunakan untuk perhitungan berikutnya.

Gaya prategang akhir ditiap strand $P_{Pe_strand} = A_{strand} x f_{pbt}(1 - losses)$

$$= 182{,}415\text{x}1395(1 - 25\%)\text{x}10^{-3}$$

$$= 190{,}851 \text{ kN}$$

Jumlah strand yang diperlukan $n_{strand_req} = \frac{P_e}{P_{e_strand}}$

$$= \frac{7765{,}932}{190{,}851}$$

$$= 40{,}691$$

Jumlah strand yang digunakan $n_{strand} = 52$

Perlu diperhatikan bahwa kuantitas kawat baja prategang yang diestimasi pada tahap awal dapat berbeda dari kuantitas akhir yang diaplikasikan. Sebagai ilustrasi dalam perancangan ini, estimasi awal menunjukkan kebutuhan 40,691 kawat, namun implementasi akhirnya menggunakan 52 *strand*. Disparitas ini timbul karena penentuan *strand* awal didasarkan pada kondisi di tengah bentang. Namun, dalam konteks jembatan gelagar pratekan segmental, perencanaan seringkali didikte oleh kondisi pada sambungan, di mana

tegangan tarik harus dihindari, yang berimplikasi pada peningkatan jumlah *strand* dibandingkan estimasi awal.

Luas baja prategag yang digunakan A_{ps} $= A_{strand} x n_{strand}$

$= 182{,}415 \text{ x } 52$

$= 9485{,}564 \text{ mm}^2$

2. Posisi tendon

   a. Posisi tendon tengah bentang

Tabel 5. 21 Posisi Tendon Pada Tengah Bentang

Baris	Jumlah Tendon	Strand Tiap Tendon	Jumlah Strand
1	3	13	39
2	1	13	13
jumlah	4		52

Jarak pusat penampang tendon 1 ke serat terbawah gelagar di tengah bentang, c_1 = 500 mm

Jarak pusat penampang tendon 2 ke serat terbawah gelagar di tengah bentang, c_2 = 125 mm

Jarak pusat penampacng tendon 3 ke serat terbawah gelagar di tengah bentang, c_3 = 125 mm

Jarak pusat penampang tendon 4 ke serat terbawah gelagar di tengah bentang, c_4 = 125 mm

Eksentrisitas tengah tendon 1 di tengah bentang, e_{c1} $= y_b - c_1$

$= 1018{,}116 - 500$

$= 518{,}116 \text{ mm}$

Eksentrisitas tengah tendon 2 di tengah bentang, $e_{c2} = y_b - c_2$

$= 1018{,}116 - 125$

$= 893{,}116$ mm

Eksentrisitas tengah tendon 3 di tengah bentang, $e_{c3} = y_b - c_3$

$= 1018{,}116 - 125$

$= 893{,}116$ mm

Eksentrisitas tengah tendon 4 di tengah bentang, $e_{c4} = y_b - c_4$

$= 1018{,}116 - 125$

$= 893{,}116$ mm

Luas tendon 1 $A_{ps1} = 12\ x\ A_{strand}$

$= 13$ x $182{,}4147$

$= 2371{,}391$ mm^2

Luas tendon 2 $A_{ps2} = 13\ x\ A_{strand}$

$= 13$ x $182{,}4147$

$= 2371{,}391$ mm^2

Luas tendon 3 $A_{ps3} = 13\ x\ A_{strand}$

$= 13$ x $182{,}4147$

$= 2371{,}391$ mm^2

Luas tendon 4 $A_{ps4} = 12\ x\ A_{strand}$

$= 12$ x $182{,}4147$

$= 2188{,}973$ mm^2

Luas total tendon $A_{pstotal} = 9485{,}564$ mm^2

Eksentrisitas rata rata tendon di tengah bentang

$$e_{mid} = \frac{A_{ps1}xe_{c1} + A_{ps2}xe_{c2} + A_{ps3}xe_{c3} + A_{ps}xe_{c4}}{A_{pstot}}$$

$$= \frac{2371{,}3916\text{x}518{,}116 + 2371{,}391\text{x}893{,}116 + 2371{,}391\text{x}893{,}116 + 2188{,}976\text{x}893{,}116}{9485{,}564}$$

$= 799{,}366$ mm

Jarak pusat penampang rata rata tendon ke sisi terbawah gelagar di tengah bentang:

$$y_{mid} = \frac{A_{ps1}xc_1 + A_{ps2}xc_2 + A_{ps3}xc_3 + A_{ps4}xc_4}{A_{pstot}}$$

$$= \frac{2371{,}391\text{x}500 + 2371{,}391\text{x}125 + 2371{,}391\text{x}125 + 2188{,}976\text{x}125}{9485{,}564}$$

$$= 218{,}75 \text{ mm}$$

Pusat penampang rata rata tendon ke sisi terbawah gelagar (y_{mid}) masih dalam zona tendon di izinkan, dimana terletak di atas y_{bs} (asumsi awal).

b. Posisi tendon pada tumpuan

Tabel 5. 22 Posisi Tendon Pada Ujung Bentang

Baris	Jumlah Tendon	Strand Tiap Tendon	Jumlah Strand
1	1	13	13
2	1	13	13
3	1	13	13
4	1	13	13
jumlah	4		52

Jarak pusat penampang tendon 1 ke serat terbawah gelagar di tumpuan, c_1 = 1800 mm

Jarak pusat penampang tendon 2 ke serat terbawah gelagar di tumpuan, c_2 = 1250 mm

Jarak pusat penampacng tendon 3 ke serat terbawah gelagar di tumpuan, c_3 = 600 mm

Jarak pusat penampang tendon 4 ke serat terbawah gelagar di tumpuan,	c_4	= 300 mm
Jarak vertikal pusat penampang tendon 1 di tumpuan ke pusat penampang tendon yang sama di tengah gelagar,	e_{p1}	$= c_{e1} - c_1$ $= 1800 - 500$ $= 1300$ mm
Jarak vertikal pusat penampang tendon 2 di tumpuan ke pusat penampang tendon yang sama di tengah gelagar,	e_{p2}	$= c_{e2} - c_2$ $= 1250 - 125$ $= 1125$ mm
Jarak vertikal pusat penampang tendon 3 di tumpuan ke pusat penampang tendon yang sama di tengah gelagar,	e_{p3}	$= c_{e3} - c_3$ $= 600 - 125$ $= 475$ mm
Jarak vertikal pusat penampang tendon 4 di tumpuan ke pusat penampang tendon yang sama di tengah gelagar,	e_{p4}	$= c_{e4} - c_4$ $= 300 - 125$ $= 175$ mm
Eksentrisitas tendon 1 di tumpuan	e_{pe1}	$= y_b - c_{e1}$ $= 1018{,}116 - 1800$ $= -781{,}884$ mm
Eksentrisitas tendon 2 di tumpuan	e_{pe2}	$= y_b - c_{e1}$ $= 1018{,}116 - 1250$ $= -231{,}884$ mm

Eksentrisitas tendon 3 di tumpuan $e_{pe3} = y_b - c_{e1}$

$= 1018{,}116 - 600$

$= 418{,}116$ mm

Eksentrisitas tendon 4 di tumpuan $e_{pe4} = y_b - c_{e1}$

$= 1018{,}116 - 300$

$= 718{,}116$ mm

Eksentrisitas rata rata tendon di tumpuan:

$$e_{end} = \frac{A_{ps1}xe_{pe1} + A_{ps2}xe_{pe2} + A_{ps3}xe_{pe3} + A_{ps}xe_{pe4}}{A_{pstot}}$$

$$= \frac{237{,}391\text{x}(-781{,}884) + 2371{,}391\text{x}(-231{,}884) + 2371{,}391\text{x}418{,}116 + 2188{,}976\text{x}718{,}116}{9485{,}564}$$

$= 30{,}616$ mm

Jarak pusat penampang rata rata tendon ke sisi terbawah gelagar di tumpuan:

$$y_{end} = \frac{A_{ps1}xc_{e1} + A_{ps2}xc_{e2} + A_{ps3}xc_{e3} + A_{ps4}xc_{e4}}{A_{pstot}}$$

$$= \frac{237{,}3916\text{x}1800 + 2371{,}391\text{x}1250 + 2371{,}391\text{x}600 + 2188{,}976\text{x}300}{9485{,}564}$$

$= 987{,}5$mm

c. Penentuan sudut angkur

Perhitungan sudut angkur pada tiap tendon menggunakan persamaan beikut ini.

Persamaan linier tendon $y = \frac{4\,xe_{pi}x\,x}{L^2}\,x\,(L-x)$

$$dy/_{dx} = \frac{4\,xe_{pi}x\;(L-2x)}{L^2}$$

Untuk x=0 (angkur pada tumpuan) maka,

$$dy/_{dx} = \frac{4\,xe_{pi}}{L}$$

Persamaan sudut angkur

$$\alpha = tan^{-1}\,dy/_{dx}$$

Dengan menggunakan persamaan diatas, didapatkan nilai sudut angkur tiap tendon seperti pada tabel di bawah ini.

Tabel 5. 23 Rekapitulasi Perhitungan Sudut Angkur

No Tendon	Jumlah Strand	Diameter Selubung	e_{pi} (m)	dy/dx	Sudut Angkur	
					α	Radian
1	13	84	1,3	0,104	0,104	5,958761
2	13	84	1,125	0,09	0,09	5,15662
3	13	84	0,475	0,038	0,038	2,17724
4	12	84	0,175	0,014	0,014	0,802141

d. Penentuan tata letak trace tendon

Letak trace tendon di setiap sambungan dapat dihitung menggukana persamaan berikut ini.

Posisi trace tendon:

$$Z_i = c_{ei} - \frac{4 \,.\, e_{pi} \,.\, x}{L_b^2} \,.\, (L_b - x)$$

Panjang Bentang Jembatan, L_b = 50 m

Jarak vertikal pusat penampang tendon di tumpuan ke pusat penampang tendon yang sama di tengah bentang gelagar, $e_{po} = e_{mid}$ = 0,7994 m

Jrak pusat penampang rata rata tendon ke sisi terbawah gelgar di tengah bentang, $c_{eo} = y_b$ = 1,018 m

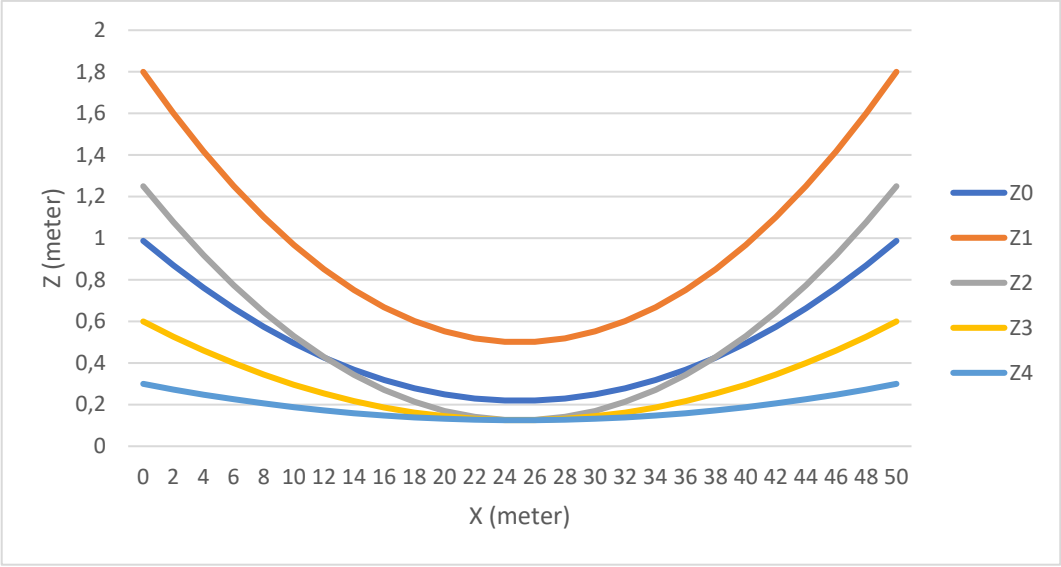
Hasil perhitungan menggunakan persamaan posisi trace tendon tersebut, dapat dilihat pada Tabel Berikut.

Tabel 5. 24 Hasil Posisi Trace Pada Tiap Tendon

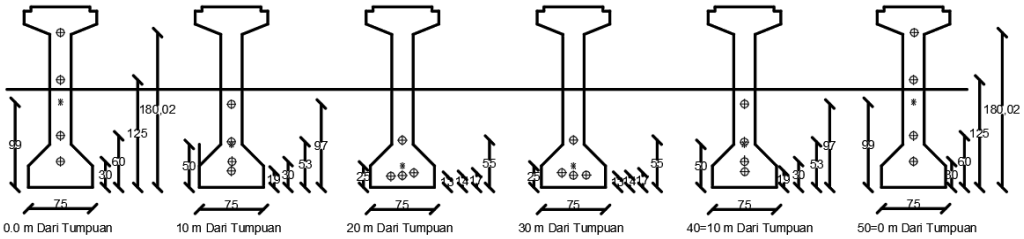
Jarak	Trace	Posisi Masing- masing Kabel			
X	Z0	Z1	Z2	Z3	Z4
0	0,9875	1,8	1,25	0,6	0,3
2	0,86942	1,60032	1,0772	0,52704	0,27312

Lanjutan Tabel 5. 23 Hasil Posisi Trace Pada Tiap Tendon

Jarak	Trace	Posisi Masing- masing Kabel			
X	Z0	Z1	Z2	Z3	Z4
4	0,76118	1,41728	0,9188	0,46016	0,24848
6	0,66278	1,25088	0,7748	0,39936	0,22608
8	0,57422	1,10112	0,6452	0,34464	0,20592
10	0,4955	0,968	0,53	0,296	0,188
12	0,42662	0,85152	0,4292	0,25344	0,17232
14	0,36758	0,75168	0,3428	0,21696	0,15888
16	0,31838	0,66848	0,2708	0,18656	0,14768
18	0,27902	0,60192	0,2132	0,16224	0,13872
20	0,2495	0,552	0,17	0,144	0,132
22	0,22982	0,51872	0,1412	0,13184	0,12752
24	0,21998	0,50208	0,1268	0,12576	0,12528
26	0,21998	0,50208	0,1268	0,12576	0,12528
28	0,22982	0,51872	0,1412	0,13184	0,12752
30	0,2495	0,552	0,17	0,144	0,132
32	0,27902	0,60192	0,2132	0,16224	0,13872
34	0,31838	0,66848	0,2708	0,18656	0,14768
36	0,36758	0,75168	0,3428	0,21696	0,15888
38	0,42662	0,85152	0,4292	0,25344	0,17232
40	0,4955	0,968	0,53	0,296	0,188
42	0,57422	1,10112	0,6452	0,34464	0,20592
44	0,66278	1,25088	0,7748	0,39936	0,22608
46	0,76118	1,41728	0,9188	0,46016	0,24848
48	0,86942	1,60032	1,0772	0,52704	0,27312
50	0,9875	1,8	1,25	0,6	0,3



Gambar 5. 29 Posisi Trace Pada Tiap Tendon



Gambar 5. 30 Posisi Tendon

Dari grafik terlihat bahwa semua tendon berada pada posisi tertinggi di dekat tumpuan (x = 0 m dan x = 50 m) dan mencapai titik terendah di tengah bentang (sekitar x = 25 m). Pola ini menunjukkan bahwa tendon dirancang mengikuti bentuk parabola untuk mengimbangi momen lentur akibat beban, sehingga gaya prategang dapat bekerja lebih efektif menahan tarik pada serat bawah gelagar.

5.3.4 Perhitungan Kehilangan Prategang

Pada struktur gelagar beton prategang, kehilangan gaya prategang dapat dikategorikan menjadi dua kelompok utama, yaitu kehilangan seketika dan kehilangan jangka panjang. Kehilangan gaya prategang tersebut tidak terjadi sekaligus, melainkan berlangsung secara bertahap melalui tiga fase. Fase pertama

terjadi pada saat transfer, fase kedua terjadi pada saat konstruksi atau ketika dilakukan pengecoran pelat dek, dan fase ketiga berlangsung pada kondisi layan. Tabel di bawah ini menggambarkan besaran kehilangan gaya prategang yang dialami gelagar pascatarik berdasarkan tahapan perencanaannya.

Tabel 5. 25 Kehilangan Prategang Pada Gelagar Pascatarik

Kehilangan Prategang (AASHTO LRFD Pasal 5.9.5)	Saat Transfer	Saat Transfer Hingga Pengecoran Dek	Saat Pengecoran Dek Hingga Waktu Akhir
Friksi	Δf_{pF}	-	-
Slip pada tendon	Δf_{pA}	-	-
Perpendekan elastis	Δf_{PES}	-	-
Susut pada gelagar	-	Δf_{pSR}	Δf_{pSD}
Rangkak pada gelagar	-	Δf_{pCR}	Δf_{pCD}
Relaksasi pada baja prategang	-	Δf_{pR1}	Δf_{pR2}
Susut pada dek saat penampang komposit	-	-	Δf_{pSS}

(Sumber: AASHTO LRFD, 2017)

1. Karakteristik Penampang Transformasi

   Pada penelitian ini, *refine method* dipilih sebagai metode perhitungan prosedur kehilangan prategang jangka panjang. Dalam penerapan metode ini, penampang ditentukan dengan menggunakan prinsip transformasi penampang. Perhitungan karakteristik penampag gelagar menggunakan konsep transformasi adalah sebagai berikut.

   a. Gelagar non komposit saat transfer

      Rasio modulus elastis baja prategang terhadap modulus elastisitas beton gelagar saat transfe,

      $$n_i = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} = \frac{197000}{32886{,}57} = 5{,}99$$

      Luas penampang tendon transformasi saat transfer,

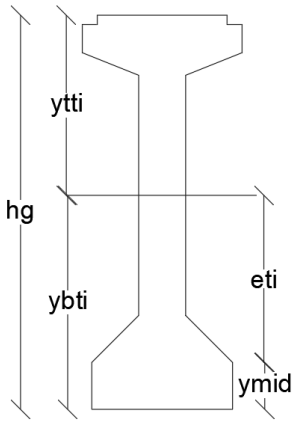
      $$A_{psi} = (n_i - 1).A_{pstotal} = (5{,}99 - 1).9485{,}564$$

$= 47335{,}691\ \text{mm}^2$

Jarak pusat penampang rata rata tendon ke sisi terbawah gelagar di tengah bentang, $y_{mid} = 218{,}75\ \text{mm}$

Tabel 5. 26 Inersia Gelagar Saat Transfer

Penampang	Luas Penampang	Jarak Thd Alas	Statis Momen	Jarak Garis Netral	Inersia	Inersia Momen
	Ai	yi	Ai x yi	ycg	Ai(yi-ycg)^2	I_0
	mm^2	mm	mm^3	mm	mm^4	mm^4
gelagar	860500	1018,116	876088500	976,4357	1494874579	4,52218 x10^{11}
strand	47335,69	218,75	10354682	976,4357	27174834563	
total	907835,7	1236,866	886443182		28669709142	4,52218 x10^{11}



Gambar 5. 31 Posisi Eksentrisitas Tendon Saat Transfer

Momen inersia penampang gelagar nonkomposit saat transfer

$$I_{ti} = \sum I_0 + \sum A\ x\ (y_i - y_{cg})^2$$

$$= 4{,}52218\ \text{x}\ 10^{11} + 28669709142$$

$$= 480888000000\ \text{mm}^4$$

Tinggi gelagar $hg = 2100\ \text{mm}$

Luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat transfer, A_{gti} $= 907835{,}6911\ \text{mm}^2$

Jarak sumbu netral ke serat terbawah penampang nonkomposit saat transfer, y_{bti}
$$= \frac{\sum A \times y}{\sum A}$$
$$= \frac{886443182}{907835{,}7}$$
$$= 976{,}436\ \text{mm}$$

Jarak sumbu netral ke serat teratas penampang gelagar nonkomposit transformasi, y_{tti}
$$= h_g - y_{bti}$$
$$= 2100 - 976{,}436$$
$$= 1123{,}564\ \text{mm}$$

Eksentrisitas tendon rata rata pada penampang gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat transfer, e_{ti}
$$= y_{bti} - y_{mid}$$
$$= 976{,}436 - 218{,}75$$
$$= 757{,}686\ \text{mm}$$

Modulus penampang serat bawah gelagar nonkomposit saat transfer, S_{bti}
$$= \frac{I_{ti}}{y_{bti}}$$
$$= \frac{480888000000}{976{,}436}$$
$$= 492493185\ \text{mm}^3$$

Modulus penampang serat atas gelagar nonkomposit saat transfer, S_{tti}
$$= \frac{I_{ti}}{y_{tti}}$$
$$= \frac{480888000000}{1123{,}564}$$
$$= 428002146{,}2\ \text{mm}^3$$

b. Gelagar non komposit saat final

Rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas beton gelagar nonkomposit saat final, n_f
$$= (E_{ps}/E_{cg})$$
$$= \frac{197000}{36768{,}3}$$
$$= 5{,}358$$

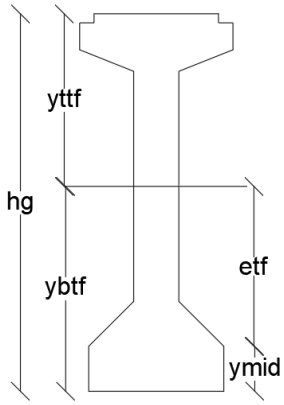
Luas penampang baja prategang (tendon) transformasi saat final, $A_{pstf} = (n_f - 1).A_{pstotal}$

$= (5{,}358 - 1).9485{,}564$

$= 41336{,}912\ \text{mm}^2$

Tabel 5. 27 Inersia Gelagar Nonkomposit Saat Final

Penampang	Luas Penampang	Jarak Thd Alas	Statis Momen	Jarak Garis Netral	Inersia	Inersia Momen
	Ai	yi	Ai x yi	ycg	Ai(yi-ycg)^2	I_0
	mm^2	mm	mm^3	mm	mm^4	mm^4
Gelagar	860500	1018,11563	876088500	981,4756283	1155212438	4,52218 x10^{11}
Strand	41336,91161	218,75	9042449,414	981,4756283	24047764201	
Total	901836,9116	1236,86563	885130949,4		25202976639	4,52218 x10^{11}



Gambar 5. 32 Posisi Eksentrisitas Tendon Saat Final Nonkomposit

Momen inersia penampang gelagar nonkomposit transformasi saat final,

$I_{tf} = \sum I_0 + \sum A\ x\ (y_i - y_{cg})^2$

$= 4{,}52218\ \text{x}\ 10^{11} + 25202976639$

$= 477421000000\ \text{mm}^4$

Tinggi gelagar hg $= 2100$ mm

Luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat final, A_{gtf} $= 901836{,}912$ mm^2

Jarak sumbu netral ke serat terbawah penampang nonkomposit transformasi saat final, y_{btf}

$$= \frac{\sum A \times y}{\sum A}$$

$$= \frac{885130949{,}4}{901836{,}9116}$$

$$= 981{,}476 \text{ mm}$$

Jarak sumbu netral ke serat teratas penampang gelagar nonkomposit saat final, y_{ttf}

$$= h_g - y_{btf}$$

$$= 2100 - 981{,}476$$

$$= 1118{,}524 \text{ mm}$$

Eksentrisitas tendon rata rata pada penampang gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat final, e_{tf}

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

$$= 981{,}476 - 218{,}75$$

$$= 762{,}726 \text{ mm}$$

Modulus penampang serat bawah penampang gelagar nonkomposit saat final, S_{btf}

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

$$= \frac{477421000000}{981{,}476}$$

$$= 492493185 \text{ mm}^3$$

Modulus penampang serat atas penampang gelagar nonkomposit saat final, S_{ttf}

$$= \frac{I_{tf}}{y_{ttf}}$$

$$= \frac{477421000000}{1118{,}524}$$

$$= 428002146{,}2 \text{ mm}^3$$

c. Gelagar komposit transformasi

Rasio modulus elastisitas gelagar terhadap modulus elastisitas pelat saat final, n_c

$$= \frac{E_{cg}}{E_{cd}}$$

$$= \frac{36768{,}3}{25135{,}11}$$

$$= 1{,}463$$

Lebar penampang sayap efektif penampang komposit saat final, b_{ec}

$$= \frac{s_g}{n_c}$$

$$= \frac{1400}{1{,}463}$$

$$= 957{,}051 \text{ mm}$$

Luas penampang pelat pada komposit saat final, A_d

$$= b_{ec} \times t_s$$

$$= 957{,}051 \times 200$$

$$= 191410{,}3145 \text{ mm}^2$$

Rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas beton gelagar komposit saat final, n_t

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

$$= \frac{197000}{36768{,}3}$$

$$= 5{,}358$$

Luas penampang baja prategang (tendon) komposit saat final, A_{psc}

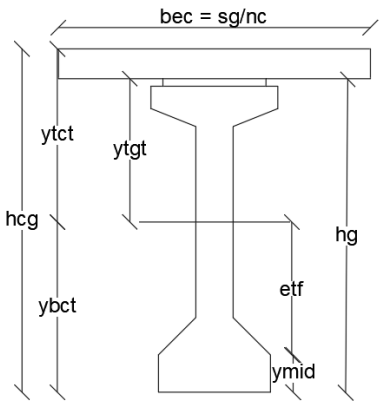
$$= (n_t - 1).A_{pstotal}$$

$$= (5{,}358 - 1).9485{,}564$$

$$= 41336{,}912 \text{ mm}^2$$

Tabel 5. 28 Inersia Gelagar Komposit Saat Final

Penampang	Luas Penampang	Jarak Thd Alas	Statis Momen	Jarak Garis Netral	Inersia	Inersia Momen
	Ai	yi	Ai x yi	ycg	Ai(yi-ycg)^2	I_0
	mm^2	mm	mm^3	mm	mm^4	mm^4
Gelagar	860500	1018,11563	876088500	1194,819991	26868623035	4,52218 x10^{11}
Strand	41336,91161	218,75	9042449,414	1194,819991	39382197696	
Pelat	191410,3145	2200	421102691,9	1194,819991	1,93398x10^{11}	8,4427 x10^{11}
Total	1093247,226	3436,86563	1306233641		2,59649 x10^{11}	1,29649 x10^{12}



Gambar 5. 33 Posisi Eksentrisitas Tendon Saat Final Komposit

Momen inersia penampang gelagar komposit transformasi saat final

$$I_{ct} = \sum I_0 + \sum A\ x\ \left(y_i - y_{cg}\right)^2$$
$$= 1{,}29649\ \text{x}1012 + 2{,}59649\ \text{x}1011$$
$$= 1556140000000\ \text{mm}^4$$

Tinggi gelagar	hg	$= 2100$ mm
Tinggi gelagar komposit	hcg	$= 2300$ mm
Luas penampang transformasi gelagar komposit saat final,	A_{cgtf}	$= 1093247{,}226\ \text{mm}^2$
Jarak sumbu netral ke serat terbawah penampang komposit transformasi saat final,	y_{bct}	$= \frac{\sum A \times y}{\sum A}$ $= \frac{1306233641}{1093247{,}226}$ $= 1194{,}820$ mm
Jarak sumbu netral ke serat teratas penampang gelagar komposit saat final,	y_{tct}	$= h_{cg} - y_{bct}$ $= 2300 - 1194{,}820$ $= 1105{,}18$ mm
jarak sumbu netral ke serat teratas penampang gelagar,	y_{tgt}	$= h_g - y_{bct}$ $= 2100 - 1194{,}820$ $= 905{,}180$ mm

Eksentrisitas tendon rata rata pada penampang gelagar komposit transformasi di tengah bentang saat final,	e_{ct}	$= y_{bct} - y_{mid}$ $= 1194{,}820 - 218{,}75$ $= 976{,}07$ mm
Modulus penampang serat bawah penampang gelagar komposit saat final,	S_{bct}	$= \frac{I_{ct}}{y_{bct}}$ $= \frac{1556140000000}{1194{,}820}$ $= 1302403088$ mm^3
Modulus penampang serat atas penampang gelagar komposit saat final,	S_{tct}	$= \frac{I_{ct}}{y_{tct}}$ $= \frac{1556140000000}{1105{,}18}$ $= 1408039626$ mm^3

2. Analisis Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang

   a. Kehilangan prategang akibat gesekan

   Kehilangan prategang akibat gesekan dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini.

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

   $\alpha = 2e_p / L_p$

   Dimana,

   f_{pj} = Tegangan baja prategang saat jacking

   K = Nilai koefisien gesek wobble

   μ = Nilai kefisien gesek kelengkungan

   x = Panjang tendon yang diukur dari *jacking* ke titik yang ditinjau

   α = Penjumlahan dari nilai absolut perubahan sudut pada jalur baja prategang dari jacking hingga ujung *jacking*

   e = Bilangan natural

Nilai kehilangan prategang akibat gesekan pada tendon dilakukan berdasarkan rata-rata geometrinya, berikut ini data data yang digunakan dalam perhitungan kehilangan gaya prategang.

Jarak vertikal pusat penampang tendon rata rata ditumpuan dengan pusat penampang tendon rata rata di tengah bentang,	ep	$= y_{end} - y_{mid}$ $= 987{,}5 - 218{,}75$ $= 768{,}75$ mm
Tegangan baja prategang saat jacking,	fj	$= f_{pbt}$ $= 1395$ MPa
Koefisien gesek wobble,	K	$= 0{,}00000066$
Koefisiean gesek kelengkungan,	μ	$= 0{,}25$
Bilangan natural,	α	$= 2{,}7$

Sehingga, dari data dan persamaan diatas didapatkan nilai kehilangan pretegang di ujung – ujung dan tengah bentang jembatan seperti pada Tabel dibawah ini.

Tabel 5. 29 Rekapitulai Kehilangan Prategang Akibat Gesekan

Titik	e_p	L_p	$\sum Lp$	α	$\sum\alpha$	Δ_{fpF}	Δ_{fpj} - Δ_{fpF}
	mm	mm	mm	radian	radian	MPa	MPa
1	768,75	0	0	0	0	0	1395
2	768,75	25000	25000	0,0615	0,0615	43,8864692	1351,114
3	768,75	25000	50000	0,0615	0,123	65,84894246	1329,151

Dari Tabel diatas dapat dilihat pada tengah bentang (25000 mm), tegangan akibat friksi sebesar 1351,114 MPa. Oleh karena itu, nilai kehilangan prategang yang terjadi di tengah bentang adalah 43,886 MPa (Δ_{fpF} = 43,886 MPa).

b. Kehilangan prategang akibat *anchorage set*

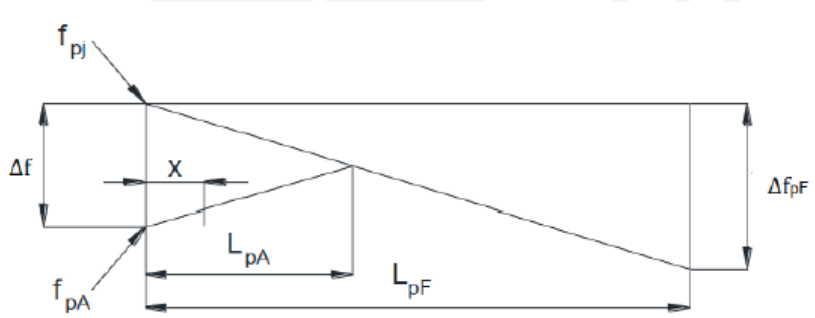
Kehilangan prategang akibat *anchorage set* dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini.

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

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

$$\Delta f = \frac{2\Delta f_{pF} \times L_{pA}}{L_{pF}}$$

Jika divisualisasikan dalam grafik, kehilangan prategang akibat *anchorage set* tampak dengan pola seperti berikut:



Gambar 5. 34 Kehilangan Pretegang Akibat Anchorage Set
(*Sumber: Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021,2021)*

Dari gambar terlihat bahwa semakin jauh jarak dari titik jacking menuju ujung tendon, gaya prategang (f) semakin berkurang. Hal ini disebabkan oleh kombinasi gesekan (friksi) sepanjang saluran tendon serta slip pada angkur, sehingga nilai prategang yang efektif di ujung lebih kecil dibandingkan gaya awal saat penegangan.

Modulus elastisitas angkur, E_s = 200000 MPa
Asumsi panjang slip tendon yang terjadi, ΔL = 9,42 mm

Panjang kehilangan prategang akibat friksi Δ_{pF}, L_{pF} = 50000 mm

Kehilangan prategang rata-rata akibat friksi, Δf_{pF} = 43,886 MPa

Dari data di atas, diperoleh panjang rata-rata bagian gelagar yang mengalami kehilangan prategang karena pergeseran angkur pada tendon, yakni sebagai berikut.

$$L_{pA} = \sqrt{\frac{Es(\Delta L) \times L_{pF}}{\Delta f_{pF}}}$$

$$= \sqrt{\frac{200000(9{,}42) \times 50000}{43{,}886}}$$

$$= 46329{,}768 \text{ mm}$$

Perubahan rata-rata tegangan akibat kehilangan prategang karena pergeseran angkur pada tendon:

$$\Delta f = \frac{2\Delta f_{pF} \times L_{pA}}{L_{pF}}$$

$$= \frac{2 \times 43{,}886 \times 46329{,}768}{50000}$$

$$= 81{,}330 \text{ MPa}$$

Berikut ini merupakan tabel rekapitulasi perhitungan kehilangan prategang akibat pergeseran angkur.

Tabel 5. 30 Rekapitulasi Hasil Kehilangan Prategang Akibat *Anchorge Set*

Lokasi		Δf_{PA}	Δf_{pF}-Δf_{pA}	Δf_{pF}
X/L	**X** **mm**	**MPa**	**MPa**	**MPa**
0	0	81,33	1292,109	1373,438905
0,1	5000	73,197	1295,748	1368,944512
0,2	10000	65,064	1299,401	1364,464826
0,3	15000	56,931	1303,069	1359,999799

Lanjutan Tabel 5. 31 Rekapitulasi Hasil Kehilangan Prategang Akibat *Anchorge Set*

Lokasi		Δf_{Pa}	Δf_{pF}-Δf_{pA}	Δf_{pF}
X/L	X mm	MPa	MPa	MPa
0,4	20000	48,798	1306,751	1355,549383
0,5	25000	40,665	1310,449	1351,113531
0,6	30000	32,532	1314,16	1346,692194
0,7	35000	24,399	1317,886	1342,285326
0,8	40000	16,266	1321,627	1337,892878
0,9	45000	8,133	1325,382	1333,514805
1	50000	0	1329,151	1329,151058

Dari Tabel diatas dapat dilihat pada tengah bentang (25000 mm), tegangan akibat *Anchorage set* sebesar 1351,113 MPa. Oleh karena itu, nilai kehilangan prategang yang terjadi di tengah bentang adalah 40,665 MPa (Δ_{fpA} = 40,665 MPa).

c. Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis

Jumlah tendon $N_{ps} = 4$

Momen akibat berat sendiri gelagar, $M_{MS_G} = 6722{,}656$ Mpa

Tegangan pada tendon saat transfer, $f_{pi1} = f_{pbt} - (\Delta f_{pF} + \Delta f_{pA})$

$= 1395 - (43{,}886 + 40{,}665)$

$= 1310{,}448$ Mpa

Gaya prategang awal, $P_i = f_{pi1} \times A_{pstotal}$

$= 1310{,}448 \times 9485{,}564$

$= 12430343{,}43$ N

Tegangan di beton pada pusat tendon saat angkur dilepas,

$$f_{cgp} = \frac{P_i}{A_g} + \frac{P_i.(e_{mid})^2}{I_g} - \frac{M_{MSG}.e_{mid}}{I_g}$$

$$f_{cgp} = \frac{12430343,43}{860500} + \frac{\mathrm{P_i}.(\mathrm{e_{mid}})^2}{4,52218\ \mathrm{x}10^{11}} - \frac{6722,656\ \mathrm{x}\ 799,}{45221822,1}$$

$$f_{cgp} = 20,126\ \mathrm{MPa}$$

Kehilangan prategang, $\Delta f_{pES} = \frac{N_{ps}-1}{2N_{ps}} \times \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \times f_{cgp}$

$$= \frac{4-1}{2\ \mathrm{x}\ 4} \times \frac{197000}{32886,57} \times 20,126$$

$$= 45,211\ \mathrm{MPa}$$

Dari perhitungan diatas nilai kehilangan prategang akibat perpendekan elastis yang didapatka sebesar 45,211 MPa (Δf_{pES} = 45,211 MPa).

3. Analisis Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Saat Transfer Hingga Pengecoran Pelat

   a. Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar

Keliling penampang gelagar tengah, $K_{llg} = 6400\ \mathrm{mm}$

Luas permukaan total gelagar, $A_{surfg} = K_{llg} \times L_b + 2A_g$

$$= 6400 \times 50000 + 2(860500)$$

$$= 321721000\ \mathrm{mm}^2$$

Volume gelagar, $V_g = A_g \times L_b$

$$= 860500 \times 50000$$

$$= 43025000000\mathrm{mm}^3$$

Rasio volume terhadap luas permukaan, $r_{VS} = \frac{V_g}{A_{surfg}}$

$$= \frac{43025000000}{321721000}$$

$$= 133,734\ \mathrm{mm}$$

Luas pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau ($k_s \geq 1$)

$$K_s = 1,45 - 0,0051 \times r_{VS}$$

$$= 1,45 - 0,0051 \times 133,734$$

$$= 0,768$$

$$K_s = 1$$

Kelembaban relatif, $H_r = 85\%$

Umur gelagar saat transfer, $t_i = 7$ hari

Umur gelagar saat pengecoran pelat, $t_d = 120$ hari

Umur gelagar saat final (saat usia akhir rencana jembatan), $t_f = 25550$ hari

Faktor kelembaban untuk susut, k_{hs}

$$= 2 - 0{,}014 \times H_r$$
$$= 2 - 0{,}014 \times 85\%$$
$$= 1{,}988$$

Faktor pengaruh kuat tekan beton, k_f

$$= \frac{35MPa}{7MPa + f'_{cig}}$$
$$= \frac{35\text{MPa}}{7\text{Mpa} + 48{,}96}$$
$$= 0{,}625$$

Perpanjangan waktu antara transfer dan pegecoran pelat, t_{di}

$$= t_d - t_i$$
$$= 120 - 7$$
$$= 113 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer,

$$k_{tddi} = \left[\frac{t_{di}}{61 - 0{,}58\left(\frac{f'_{cig}}{Mpa}\right) + t_{di}}\right]$$
$$= \left[\frac{113}{61 - 0{,}58(48{,}96) + 113}\right]$$
$$= 0{,}776$$

Regangan susut gelagar antara waktu transfer dan pengecoran pelat,

$$\varepsilon_{bid} = k_s \times k_{hs} \times k_f \times k_{tddi} \times 0{,}48 \times 10^{-3}$$
$$= 1 \times 1{,}988 \times 0{,}625 \times 0{,}776 \times 0{,}48 \times 10^{-3}$$
$$= 0{,}000463$$

Faktor kelembaban untuk rangkak, k_{hc}

$$= 1{,}56 - 0{,}008 . H_r$$
$$= 1{,}56 - 0{,}008 \, . 85\%$$
$$= 1{,}553$$

Perpanjangan waktu antara transfer dan final, $t_{fi} = t_f - t_i$

$= 25550 - 7$

$= 25543$ hari

Faktor perpanjangan waktu antara final dan transfer,

$$k_{tdfi} = \left[\frac{t_{fi}}{61 - 0{,}58\left(\frac{f'_{cig}}{Mpa}\right) + t_{fi}}\right]$$

$$= \left[\frac{25543}{61 - 0{,}58(48{,}96) + 25543}\right]$$

$$= 1$$

Koefisien rangkak gelagar saat waktu final karena pembebanan saat transfer,

$$\Psi_{tfti} = 1{,}9 \times k_s \times k_{hc} \times k_f \times k_{tdfi} \times t_i^{-0{,}118}$$

$$= 1{,}9 \times 1 \times 1{,}553 \times 0{,}625 \times 1 \times 7^{-0{,}118}$$

$$= 1{,}465$$

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terletak dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu transfer dan pengecoran pelat:

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \times \frac{A_{ps}}{A_g} \times \left(1 + \frac{A_g \times (e_{mid})^2}{I_g}\right) \times \left(1 + 0{,}7 \times \Psi_{tfti}\right)}$$

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{197000}{32886,} \times \frac{9485{,}564}{860500} \times \left(1 + \frac{860500 \times (799{,}365)^2}{4{,}52218.10^{11}}\right) \times (1 + 0{,}7 \times 1{,}465)}$$

$$k_{id} = 0{,}860$$

Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar, $\Delta f_{pSR} = \varepsilon_{bid} \times E_{ps} \times k_{id}$

$= 0{,}000463 \times 197000 \times 0{,}860$

$= 78{,}487$ MPa

b. Kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar

Kehilangan prategang akibat rangkak pada rentang waktu antara transfer dan pengecoran pelat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$\Delta f_{pCR} = \frac{E_{ps}}{Eci} \times f_{cgp} \times \Psi_{tdti} \times k_{id}$$

Nilai f_{cgp} ditentukan berdasarkan besar gaya prategang setelah proses transfer serta momen yang ditimbulkan oleh berat sendiri gelagar. Dalam perhitungan ini digunakan properti penampang gelagar nonkomposit pada saat transfer yang telah ditransformasi.

Kehilangan tendon akibat relaksasi tendon rentang waktu transfer hingga pengecoran pelat, $\Delta f_{PR1} = 8$ MPa

Tegangan saat setelah transfer pada strand, $f_{pi2} = f_{pbt} - \left(\Delta f_{pES} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pR1}\right)$

$= 1395 - (45{,}21 + 43{,}886 + 8)$

$= 1297{,}903$ MPa

Gaya prategang saat setelah transfer, $P_i = f_{pi2} \times A_{pstotal}$

$= 1297{,}903 \times 9485{,}564$

$= 12311339{,}62$ N

Tegangan di beton pada level tendon saat setelah transfer,

$$f_{cgpi} = \left[-\frac{P_i}{A_{gti}} - \frac{P_i . e_{ti}}{I_{ti}} + \frac{M_{MSG} . e_{ti}}{I_{ti}}\right]$$

$$= \left[-\frac{12311339{,}62}{907835{,}691} - \frac{12311339{,}62 \,.\, 757{,}686}{4{,}80888.10^{11}} + \frac{6722{,}656 \,.\, 757{,}686}{4{,}80888.10^{11}}\right]$$

$= 13{,}581$ MPa

Koefisien rangkak gelagar saat waktu transfer dan penempatan pelat karena pembebanan saat transfer,

$$\Psi_{tdti} = 1{,}9 \times k_s \times k_{hc} \times k_f \times k_{tddi} \times t_i^{-0{,}118}$$

$= 1{,}9 \times 1 \times 1{,}553 \times 0{,}776 \times 1 \times 7^{-0{,}118}$

$= 1{,}138$

Kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar, $\Delta f_{pCR} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \times f_{cgpi} \times \Psi_{tdti} \times k_{di}$

$= \frac{197000}{32886{,}57} \times 13{,}58 \times 1{,}1385 \times 0{,}860$

$= 79{,}667$ MPa

Dari data dan perhitunagn diatas didapatkan nilai kehilangan akibat rangkak pada gelagar sebesar 79,77 MPa (Δf_{pCR}=79,77MPa).

c. Kehilangan prategang akibat relaksasi tendon

Berdasarkan pasal 5.9.3.4.2c AASHTO LRFD untuk *low relaxation strand* nilai Δf_{pR1} sebesar 8 MPa diperbolehkan. Maka, nilai Δf_{pR1} yang digunakan adalah 8 MPa (Δf_{pR1}=8 MPa)

4. Analisis Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Saat Pengecoran Pelat Hingga Final

a. Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar

Perpanjangan waktu antara pegecoran pelat hingga final, $t_{fd} = t_f - t_d$

$= 25550 - 120$

$= 25430$ hari

Faktor perpanjangan waktu antara final dan pengecoran pelat,

$$k_{tdfd} = \left[\frac{t_{fd}}{61 - 0{,}58\left(\frac{f'_{cig}}{Mpa}\right) + t_{fd}}\right]$$

$$= \left[\frac{25430}{61 - 0{,}58(48{,}96) + 25430}\right]$$

$$= 1$$

Regangan susut gelagar antara waktu final dan transfer,

$$\varepsilon_{bif} = k_s \times k_{hs} \times k_f \times k_{tdfd} \times 0{,}48 \times 10^{-3}$$

$$= 1 \times 1{,}988 \times 0{,}625 \times 1 \times 0{,}48 \times 10^{-3}$$

$$= 0{,}000596$$

Regangan susut gelagar antara waktu final dan pengecoran pelat, $\varepsilon_{bdf} = \varepsilon_{bif} - \varepsilon_{bid}$

$= 0{,}000596 - 0{,}000463$

$= 0{,}000133$

Eksentrisitas tedon pada penampang komposit, $e_{cg} = y_{bcg} - y_{mid}$

$= 1308{,}275 - 218{,}75$

$= 1089{,}526$ mm

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terletak dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara pengecoran pelat dan final:

$$k_{df} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \times \frac{A_{ps}}{A_{cg}} \times \left(1 + \frac{A_{cg} \times (e_{mid})^2}{I_{cg}}\right) \times (1 + 0{,}7 \times \Psi_{tfi})}$$

$$= \frac{1}{1 + \frac{197000}{32886,} \times \frac{9485{,}564}{1140500} \times \left(1 + \frac{1140500 \times (799{,}365)^2}{8{,}4427.10^{11}}\right) \times (1 + 0{,}7 \times 1{,}465)}$$

$= 0{,}792$

Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar, $\Delta f_{pSD} = \varepsilon_{bdf} \times E_{ps} \times k_{df}$

$= 0{,}000133 \times 197000 \times 0{,}792$

$= 20{,}731$ Mpa MPa

b. Kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar

Koefisien rangkak gelagar waktu antara pengecoran pelat dan final,

$$\Psi_{tftd} = 1{,}9 \times k_s \times k_{hc} \times k_f \times t_d^{-0{,}118}$$

$$= 1{,}9 \times 1 \times 1{,}553 \times 0{,}625 \times 1 \times 120^{-0{,}118}$$

$$= 1{,}048$$

Perubahan tegangan pada beton antara transfer dan pengecoran pelat karena kehilangan prategang, pengecoran pelat, dan beban mati tambahan, ditentukan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$\Delta f_{cd} = -\left(\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pR1}\right).\frac{A_{ps}}{A_g}.\left(1 + \frac{A_g.(e_{mid})^2}{I_g}\right) - \left(\frac{M_s.e_{tf}}{I_{tf}} + \frac{M_A.e_{ct}}{I_{ct}}\right)$$

Momen akibat berat pelat dan diafragma yang bekerja pada gelagar nonkomposit transformasi final:

$$M_S = M_{MSG} + M_{MSD}$$
$$= 2187{,}5 + 415{,}078$$
$$= 2602{,}578 \text{ kNm}$$

Momen akibat berat aspal, trotoar, genangan air dan barrier,

$$M_A = M_{MAA} + M_{MAH} + M_{MABR} + M_{MATR}$$
$$= 481{,}25 + 214{,}375 + 585{,}937 + 292{,}969$$
$$= 1574{,}531 \text{ kNm}$$

Perubahan tegangan pada beton antara transfer dan pengecoran pelat,

$$\Delta f_{cd} = -(\Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pR1}) \frac{A_{ps}}{A_g} . \left(1 + \frac{A_g . (e_{mid})^2}{I_g}\right) - \left(\frac{M_s . e_{tf}}{I_{tf}} + \frac{M_A . e_{ct}}{I_{ct}}\right)$$
$$= -(78{,}487 + 79{,}667 + 8) \frac{9485{,}564}{860500} . \left(1 + \frac{860500 . (799{,}366)^2}{4{,}52218 . 10^{11}}\right)$$
$$- \left(\frac{2602{,}578 \times 767{,}726}{4{,}77421 . 10^{11}} + \frac{1574{,}531 \times 976{,}07}{1{,}55614 . 10^{12}}\right)$$
$$= -4{,}058 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar,

$$\Delta f_{pCD} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} . f_{cgpi} . (\Psi_{tfti} - \Psi_{tdti}) . k_{df} + \frac{E_{ps}}{E_{cg}} . \Delta f_{cd} . \Psi_{tftd} . k_{df}$$
$$= \frac{197000}{32886,} . 13{,}580 . (1{,}465 - 1{,}138) . 0{,}792 + \frac{197000}{36768{,}3} . (-4{,}058) . 1{,}048 . 0{,}79$$
$$= 2{,}99 \text{ MPa}$$

c. Kehilangan prategang akibat relaksasi tendon

Berdasarkan pasal 5.9.3.4.2c AASHTO LRFD untuk *low relaxation strand* nilai Δf_{pR1} sebesar 8 MPa diperbolehkan. Maka, nilai Δf_{Pr2} yang digunakan adalah 8 MPa (Δf_{pR2}=8 MPa).

d. Tambahan prategang akibat penyusutan pelat

Lebar sayap, $b_{ef} = 1850$ mm

Luas penampang pelat, $A_d = t_s \times b_{ef}$
$= 200 \times 1850$
$= 370000 \text{ mm}^2$

Panjang perimeter penampang pelat, k_{lld}

$$= 2t_s + 2b_{ef}$$
$$= 2(200) + 2(1850)$$
$$= 4100 \text{ mm}$$

Luas permukaan total pelat A_{surfd}

$$= k_{lld} \times L_b + 2A_d$$
$$= 4100 \times 50000 + 2(370000)$$
$$= 205740000 \text{ mm}^2$$

Volume pelat V_d

$$= A_{surfd} \times L_b$$
$$= 205740000 \times 50000$$
$$= 1{,}0287 \text{ x}10^{13} \text{ mm}^3$$

Rasio volume terhadap lauas permukaan, r_{VSd}

$$= \frac{V_d}{A_{surfd}}$$
$$= \frac{1{,}0287 \text{ x}10^{13}}{205740000}$$
$$= 50000 \text{ mm}$$

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau (ks≥1)

$$k_{sd} = 1{,}45 - 0{,}0051\, r_{VSd}$$
$$= 1{,}45 - 0{,}0051\ (50000)$$
$$= -253{,}55 \text{ mm}$$
$$k_{sd} = 1 \text{ mm}$$

Faktor kelembaban untuk susut, k_{hsd}

$$= 2 - 0{,}014\ \text{H}_\text{r}$$
$$= 2 - 0{,}014\ .\ 85\%$$
$$= 1{,}99$$

Faktor pengaruh kuat tekan beton, k_{fd}

$$= \frac{35 \text{ MPa}}{7 \text{ MPa} + f'_{cid}}$$
$$= \frac{35 \text{ MPa}}{7 \text{ MPa} + 22{,}88}$$
$$= 1{,}171$$

Perpanjangan waktu antara pegecoran pelat dan final, t_{dd}

$$= t_f - t_d$$
$$= 2550 - 120$$
$$= 25430 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final,

$$k_{tddf} = \left[\frac{t_{dd}}{61 - 0{,}58.\left(\frac{f'_{cid}}{Mpa}\right) + t_{dd}}\right]$$

$$= \left[\frac{25430}{61 - 0{,}58.\,(22{,}88) + 25430}\right]$$

$$= 0{,}998$$

Regangan susut pelat antara pengecoran pelat dan final,

$$\varepsilon_{ddf} = k_{sd} \times k_{hsd} \times k_{fd} \times k_{tddf} \times 0{,}488\,.\,10^{-3}$$

$$= 1 \times 1{,}988 \times 1{,}171 \times 0{,}99 \times 0{,}488\,.\,10^{-3}$$

$$= 0{,}00111$$

Koefisien rangkak pelat saat waktu final karena pembebanan,

$$\Psi_{tftdd} = 1{,}9 \times k_{sd} \times k_{hc} \times k_{fd} \times k_{tdfd} \times t_i^{-0{,}118}$$

$$= 1{,}9 \times 1 \times 1{,}553 \times 1{,}171 \times 0{,}998 \times 7^{-0{,}118}$$

$$= 2{,}742$$

Eksentrisitas pelat terhadap titikberat penampang komposit,

$$e_d = y_{tcg} + \frac{t_s}{2}$$

$$= 791{,}724 + \frac{200}{2}$$

$$= 891{,}724 \text{ mm}$$

Ragkak pada pelat beton,

$$\Delta f_{cfd} = \frac{\varepsilon_{ddf}\,.\,A_d\,.\,E_{cd}}{1 + 0{,}7\,.\,\Psi_{tftdd}}.\left(\frac{1}{A_{cg}} - \frac{e_{cg}\,.\,e_d}{I_{cg}}\right)$$

$$= \frac{0{,}00111 \times 370000 \times 25135{,}11}{1 + 0{,}7\,.\,\Psi_{\text{tftdd}}}.\left(\frac{1}{1140500} - \frac{1089{,}526 \times 891.724}{8{,}4427\,.\,10^{11}}\right)$$

$$= -0{,}974 \text{ MPa}$$

Besar gaya prategang tambahan akibat susut di pelat,

$$\Delta f_{pSS} = \left[\frac{E_{ps}}{E_{cg}}.\Delta f_{cfd}.k_{df}.\left(1+0{,}7.\Psi_{tftdd}\right)\right]$$

$$= \left[\frac{197000}{36768{,}3} \times (-0{,}974).0{,}792.(1+0{,}7\times 2{,}742)\right]$$

$$= 12{,}061 \text{ MPa}$$

5. Rekapitulasi Kehilangan Prategang Gelagar Pascatarik

Tabel 5. 32 Rekapitulasi Kehilangan Prategang Gelagar Pascatarik

Kehilangan Prategang	Saat Transfer (MPa)	Saat Transfer Hingga Pengecoran Dek (MPa)	Saat Pengecoran Dek Hingga Waktu Akhir (MPa)
Δf_{pF}	43,886		
Δf_{pA}	40,665		
Δf_{PES}	45,211		
$\Delta f_{pSR}\,\Delta f_{pSD}$		78,487	20,731
$\Delta f_{pCR}\,\Delta f_{pCD}$		79,667	2,999
$\Delta f_{pR1}\,\Delta f_{pR2}$		8	8
Δf_{pSS}			12,061

6. Perhitungan Gaya Prategang Efektif Akhir

a. Total kehilangan prategang

Total kehilangan seketika

$$\Delta f_{pST} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES}$$

$$= 40{,}665 + 43{,}886 + 45{,}211$$

$$= 129{,}762 \text{ MPa}$$

Kehilangan tergantung waktu

$$\Delta f_{pLT} = \Delta f_{pSR} + \Delta f_{pCR} + \Delta f_{pR1} + \Delta f_{pSD} + \Delta f_{pR2} + \Delta f_{pCD} + \Delta f_{pSS}$$

$$= 78{,}487 + 79{,}667 + 8 + 20{,}731 + 8 + 2{,}999 + 12{,}061$$

$$= 185{,}824 \text{ MPa}$$

Total kehilagan prategang

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES} + \Delta f_{pLT}$$
$$= 40{,}665 + 43{,}886 + 45{,}211 + 185{,}824$$
$$= 315{,}586 \text{ MPa}$$

Persentase (%) kehilangan prategang dapat diketahui menggunakan persamaan dibawah ini.

Kondisi kehilangan prategang jangka pendek

$$\%\text{kehilangan } D_{PST} = \frac{\Delta f_{pA} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pES}}{f_{pbt}} \times 100$$
$$= \frac{40{,}665 + 43{,}886 + 45{,}211}{1395} \times 100$$
$$= 9{,}302\%$$

Kondisi prategang efektif jamgka pendek UTS D_{PST}

$$\%UTS\ D_{PST} = 75\% - \%D_{PST}$$
$$= 75\% - 9{,}302\%$$
$$= 65{,}698\%$$

Kondisi kehilangan prategang jangka panjang (D_{PLT})

$$\%\text{kehilangan } D_{PLT} = \frac{\Delta f_{pLT}}{f_{pbt}} \times 100$$
$$= \frac{185{,}824}{1395} \times 100$$
$$= 13{,}321\%$$

Kondisi prategang efektif jangka panjang UTS D_{PLT}

$$\%\text{UTS } D_{PLT} = 75\% - \%D_{PST}$$
$$= 75\% - 13{,}321\%$$
$$= 61{,}679\%$$

Berikut ini rekapitulasi kehilangan prategang di tengah bentang gelagar.

Tabel 5. 33 Rekapitulasi Kehilangan Prategang Di Tengah Bentang

Kondisi	Kehilangan prategang (MPa)	% kehilangan prategang	%UTS prategang efektif
Jangka Pendek	129,762	9,302	65,698
Jangka Panjang	185,824	13,321	61,679
Jumlah		22,623	

Dilihat dari data dan tabel diatas dapat disimpulkan kehilangan gaya prategang adalah:

$$Losses\ final = 75\% - \%UTS\ D_{PLT}$$
$$= 75\% - 61{,}679\%$$
$$= 13{,}321\%$$

b. Gaya prategang final efektif

Gaya prategangfinal efektif dapat ditentukan dengan persamaan berikut

$$Max f_{pe} = 0{,}8 \times f_{py}$$
$$= 0{,}8 \times 1584$$
$$= 1267{,}2 \text{ MPa}$$

Tegangan prategang efektif aktual setelah kehilangan

$$f_{pe} = 0{,}75 \times f_{pu} - \Delta f_{pT}$$
$$= 0{,}75 \times 180 - 315{,}586$$
$$= 1079 \text{ MPa}$$

Periksa batas maksimum prategnag efektif fpe ≤ Maxfpe

1079 ≤ 1267,2 syarat batas maksimum prategang efektif terpenuhi.

Perhitungan gaya prategang final efektif

$$P_{eff} = A_{pstotal} \times f_{pe}$$
$$= 9485{,}564 \times 1079$$
$$= 10238850{,}25 \text{ N}$$
$$= 10238{,}850 \text{ kN}$$

5.3.5 Pemeriksaan Tegangan

Pemeriksaan tegangan dilakukan saat beban maksimum dan eksentrisitas tendon berada pada posisi maksimum.

1. Tegangan izin

   Analisis tegangan dilakukan pada kondisi di mana eksentrisitas tendon dan beban kerja berada dalam keadaan maksimum.

   Tegangan izin beton kondisi transfer

   Tarik $\sigma t_i = 0{,}5 \text{ x } \sqrt{f'cig}$

   $= 0{,}5 \text{ x } \sqrt{48{,}96}$

   $= 1{,}749$ MPa

   Tekan $\sigma c_i = -0{,}6 \text{ x } f'cig$

   $= -0{,}6 \text{ x } 48{,}96$

   $= -29{,}376$ MPa

   Tegangan izin beton kondisi layan

   Tarik $\sigma t_{serv} = 0{,}5 \text{ x } \sqrt{f'cg}$

   $= 0{,}5 \text{ x } \sqrt{61{,}2}$

   $= 3{,}911$ MPa

   Tekan $\sigma c_{serv} = -0{,}45 \text{ x } f'cg$

   $= -0{,}45 \text{ x } 61{,}2$

   $= -27{,}54$ MPa

   Tegangan izin beton kondisi layan

   Tarik $\sigma t_{serv_s} = 0{,}5 \text{ x } \sqrt{f'cd}$

   $= 0{,}5 \text{ x } \sqrt{28{,}6}$

   $= 2{,}674$ MPa

   Tekan $\sigma c_{serv_s} = -0{,}45 \text{ x } f'cd$

   $= -0{,}45 \text{ x } 28{,}6$

   $= -12{,}87$ MPa

2. Tegangan penampang saat transfer

Kondisi transfer merupakan tahap awal saat gaya prategang mulai diaplikasikan pada penampang. Pada tahap ini, hanya beban yang bekerja adalah berat sendiri gelagar, sementara gaya prategang berada pada nilai maksimum.

Gaya prategang jacking $P_{jacking}$ $= 0{,}75\ x\ f_{pu}\ x\ A_{ps_tot}$

$= 0{,}75$ x1860 x 9485,564

$= 13232361{,}79$ N

Gaya prategang inisial P_{trans} $= P_{jacking}\ x\ A_{ps_tot}$

$= 13232361{,}79$ x 9485,564

$= 11624084{,}41$ N

Tegangan pada serat atas penampang, ft_i $= \frac{-P_{trans}}{A_g} + \frac{P_{trans} x e_{mid}}{S_t} + \frac{-MMS_G}{S_t}$

$= \frac{-11624084{,}41}{8605\ \text{x}100} + \frac{11624084{,}41\text{x}799{,}366}{417991{,}269\ \text{x}1000} + \frac{-(6722{,}656)\text{x}10^6}{417991{,}269\text{x}1000}$

$= -7{,}362$ MPa

Periksa tegangan atas $ft_i \leq \sigma ci$ $|-7{,}362| \leq |-29{,}376|$ OK

Tegangan pada serat bawah, fb_i $= \frac{-P_{trans}}{A_g} - \frac{P_{trans} x e_{mid}}{S_b} + \frac{-MMS_G}{S_b}$

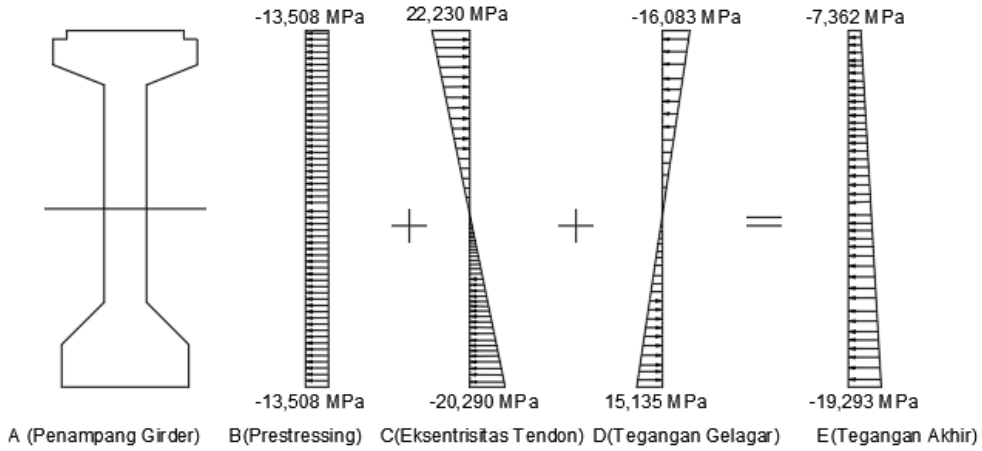
$= \frac{-11624084{,}41}{8605\ \text{x}100} + \frac{11624084{,}41\text{x}799{,}366}{444171{,}769\ \text{x}1000} + \frac{-(6722{,}656)\text{x}10^6}{444171{,}769\text{x}1000}$

$= -19{,}293$ MPa

Periksa tegangan bawah $fb_i \leq \sigma ci$ $|-19{,}293| \leq |-29{,}376|$ OK

Tabel 5. 34 Rekapitulasi Tegangan Pada Saat Transfer

Kondis	Lokasi	$P_{transfer} / Ag$ (MPa)	$P_{transfer}.e_{mid} / S$ (MPa)	M_{S_SG} / S	Total
Transfer	Atas gelagar	-13,508	22,230	-16,083	-7,362
	Bawah gelagar	-13,508	-20,920	15,135	-19,293



Gambar 5. 35 Tegangan Pada Saat Transfer

Gambar A menunjukkan penampang girder nonkomposit, Gambar B menunjukkan distribusi tegangan merata akibat gaya prategang langsung, Gambar C menunjukkan tegangan tambahan akibat adanya eksentrisitas tendon, Gambar D menunjukkan tegangan akibat momen dari berat sendiri gelagar, dan Gambar E menunjukkan tegangan akhir. Berdasarkan gambar diatas, dapat diketahui bahwa tegangan akhir pasa saat transfer adalah -7,362 MPa untuk serat atas dan -19,293 MPa untuk serat bawah.

3. Tegangan penampang pada masa konstruksi

Saat pelaksanaan konstruksi, gelagar menerima beban dari pekerjaan pengecoran pelat lantai, serta diafragma. Karena belum terjadi aksi komposit

dengan pelat lantai, beban tersebut belum dapat didistribusikan, dan sepenuhnya ditanggung oleh gelagar.

Tegangan pada serat atas penampang, ft_{kons}

$$= \frac{-P_{trans}}{A_g} + \frac{P_{trans} x e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_s}{S_t}$$

$$= \frac{-11624084{,}41}{8605\ \text{x}100} + \frac{11624084{,}41\text{x}799{,}366}{417991{,}269\ \text{x}1000}$$

$$+ \frac{-(2187{,}5 + 6722{,}656 + 415{,}0781)\text{x}10^6}{417991{,}269\text{x}1000}$$

$$= -13{,}5883\ \text{MPa}$$

Periksa tegangan atas $ft_{kons} \leq \sigma ci$ $|-13{,}5883| \leq |-29{,}376|$ OK

Tegangan pada serat bawah, fb_{kons}

$$= \frac{-P_{trans}}{A_g} - \frac{P_{trans} x e_{mid}}{S_b} + \frac{-M_s}{S_b}$$

$$= \frac{-11624084{,}41}{8605\ \text{x}100} + \frac{11624084{,}41\text{x}799{,}366}{444171{,}769\ \text{x}1000}$$

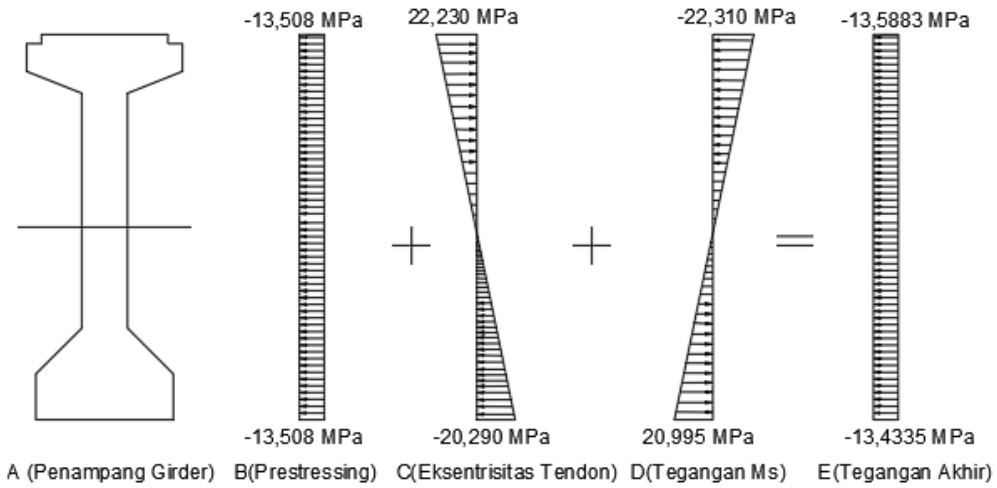
$$+ \frac{-(2187{,}5 + 6722{,}656 + 415{,}0781)\text{x}10^6}{444171{,}769\text{x}1000}$$

$$= -13{,}4335\ \text{MPa}$$

Periksa tegangan bawah $Fb_{kons} \leq \sigma ci$ $|-13{,}4335| \leq |-29{,}376|$ OK

Tabel 5. 35 Rekapitulasi Tegangan Pada Saat Konstruksi

Kondis	Lokasi	$P_{transfer}/Ag$ (MPa)	$P_{transfer}.e_{mid}/S$ (MPa)	M_S/S	Total
Konstruksi	Atas gelagar	-13,508	22,230	-22,310	-13,5883
	Bawah gelagar	-13,508	-20,920	20,995	-13,4335



Gambar 5. 36 Tegangan Pada Saat Konstruksi

Gambar A menunjukkan penampang girder nonkomposit, Gambar B menunjukkan distribusi tegangan merata akibat gaya prategang langsung, Gambar C menunjukkan tegangan tambahan akibat adanya eksentrisitas tendon, Gambar D menunjukkan tegangan akibat momen dari berat sendiri gelagar, dan Gambar E menunjukkan tegangan akhir. Berdasarkan tabel dan gambar diatas nilai tegangan akhir selama konstruksi adalah hasil penjumlahan tegangan prestressing, eksentrisitas tendon, dan tegangan Ms. sehingga dapat diketahui bahwa tegangan akhir pasa saat konstruksi adalah (-13,5883 MPa) untuk serat atas dan (-13,4335 MPa) untuk serat bawah.

4. Tegangan penampang kondisi layan

Pada tahap layan, seluruh beban rencana telah bekerja secara penuh dan aksi komposit antara gelagar serta pelat lantai telah terbentuk. Dalam kondisi ini, beban mencapai nilai maksimum, sementara gaya prategang telah mengalami penurunan akibat kehilangan jangka panjang. Mengacu pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/BM/2021, evaluasi tegangan dilakukan dengan menggunakan Kombinasi Daya Layan I untuk memeriksa tegangan tekan, dan Kombinasi Daya Layan III untuk memeriksa tegangan tarik.

Gaya prategang efektif P_{eff} = 7765932,129 N

Tegangan pada serat atas penampang:

$$f_{t_serv_I_ps} = -\frac{P_{eff}}{A_g} + \frac{P_{eff} xe_{mid}}{S_t}$$

$$= -\frac{7765932,129}{8605 \text{ x}100} + \frac{7765932,129\text{x}799,366}{417991,269 \text{ x}1000}$$

$$= 5,827 \text{ MPa}$$

$$f_{t_serv_I_load} = -\frac{M_S}{S_t} - \frac{M_A}{S_{tcg}} - \frac{M_{LL}}{S_{tcg}} - \left(\frac{M_{AL_{EWL}} + 0,3M_{AL_{EWS}}}{S_{tcg}}\right)$$

$$= \frac{-(2187,5 + 6722,656 + 415,0781)\text{x}10^6}{417991,269\text{x}1000}$$

$$- \frac{(585,937 + 292,969 + 481,25 + 214,375)\text{x}10^6}{1066368,43\text{x}1000}$$

$$- \frac{(1200,5 + 3150 + 35 + 390,625)\text{x}10^6}{1066368,43\text{x}1000}$$

$$- \left(\frac{249,313 + 0,3\text{x}469,286}{1066368,43}\right)$$

$$= -28,631 \text{ MPa}$$

$$f_{t_serv_I_top} = f_{t_serv_I_ps} + f_{t_serv_I_load}$$

$$= 5,827 - 28,631$$

$$= -22,804 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas saat layan I, $f_{t_serv_I_top} \leq \sigma c_{serv}$ OK

Tegangan pada serat bawah penampang:

$$f_{b_serv_III_ps} = -\frac{P_{eff}}{A_g} + \frac{P_{eff} xe_{mid}}{S_b}$$

$$= -\frac{7765932,129}{8605 \text{ x}100} - \frac{7765932,129\text{x}799,366}{444171,769 \text{ x}1000}$$

$$= -23,0 \text{ MPa}$$

$$f_{b_serv_III_load} = \frac{M_S}{S_b} + \frac{M_A}{S_{bcg}} + \frac{0{,}8xM_{LL}}{S_{bcg}}$$

$$= \frac{(2187{,}5 + 6722{,}656 + 415{,}0781)\text{x}10^6}{444171{,}769\text{x}1000}$$

$$+ \frac{(585{,}937 + 292{,}969 + 481{,}25 + 214{,}375)\text{x}10^6}{645330{,}112\text{x}1000}$$

$$+ \frac{0{,}8\text{x}(960{,}4 + 2520 + 28 + 321{,}5)\text{x}10^6}{645330{,}112\text{x}1000}$$

$$= 28{,}171 \text{ MPa}$$

$$f_{b_serv_III_bot} = f_{b_serv_III_ps} + f_{b_serv_III_load}$$

$$= -23{,}0 + 28{,}171$$

$$= 5{,}170 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan bawah saat layan III, $f_{b_serv_III_bot} \leq \sigma c_{serv}$ OK

Pada kondisi layan, pelat lantai menerima beban dari barrier, lapisan aspal, beban lalu lintas kendaraan, serta pengaruh angin, yang seluruhnya dipikul oleh penampang komposit hasil transformasi. Tegangan yang timbul pada penampang transformasi kemudian dikonversi menjadi tegangan pada penampang komposit asli (belum ditransformasi), dengan cara membagi nilai tegangan tersebut terhadap faktor transformasi n. Oleh karena itu, perhitungan tegangan pada pelat lantai dilakukan berdasarkan pendekatan ini.

$$n = \frac{E_{cg}}{E_{cd}}$$

$$= \frac{3768{,}3}{25135{,}11}$$

$$= 1{,}463$$

$$f_{ts} = -\frac{M_A}{S_{tcd}.n} - \frac{M_{LL}}{S_{tcd}.n} - \frac{M_{AL_{EWL}} + 0{,}3M_{AL_EWS}}{S_{tcd}.n}$$

$$= -\frac{(585{,}937 + 292{,}969 + 481{,}25 + 214{,}375)\text{x}10^6}{851315{,}015\ \text{x}1000\ \text{x}\ 1{,}436}$$

$$-\frac{(1200{,}5 + 3150 + 35 + 390{,}625)\text{x}10^6}{851315{,}015\ \text{x}1000\ \text{x}\ 1{,}436}$$

$$-\frac{249{,}313 + 0{,}3\text{x}469{,}286}{851315{,}015\ \text{x}1000\ \text{x}\ 1{,}436}$$

$$= -5{,}413\ \text{MPa}$$

Periksa tegangan atas saat layan I $f_{ts} \leq \sigma c_{serv}$ OK

f_{bs} $= -\frac{M_A}{S_{bcd}.n} - \frac{M_{LL}}{S_{bcd}.n}$

$$= -\frac{(585{,}937 + 292{,}969 + 481{,}25 + 214{,}375)\text{x}10^6}{1066368{,}43\ \text{x}1000\ \text{x}\ 1{,}436}$$

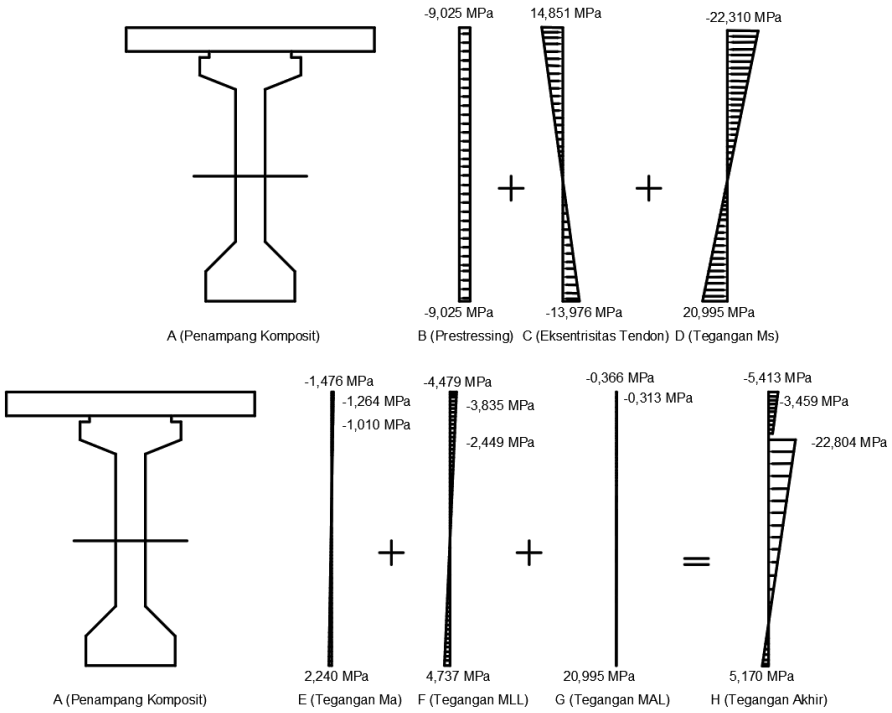
$$-\frac{(960{,}4 + 2520 + 28 + 312{,}5)\text{x}10^6}{1066368{,}43\ \text{x}1000\ \text{x}\ 1{,}436}$$

$$= -3{,}459\ \text{MPa}$$

Periksa tegangan bawah saat layan III $f_{bs} \leq \sigma c_{serv}$

Tabel 5. 36 Rekapitulasi Tegangan Pada Saat Layan

Kondisi	**Lokasi**	$\frac{P_{eff}}{A_g}$	$\frac{P_{eff}.e_{mid}}{S}$	$\frac{M_S}{S}$	$\frac{M_A}{S}$	$\frac{M_{LL}}{S}$	$\frac{M_{AL}}{S}$	**Total**
		MPa	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**MPa**	**MPa**
Layan	Atas gelagar	-9,025	14,851	-22,310	-1,476	-4,479	-0,366	-22,804
	Bawah gelagar	-9,025	-13,976	20,995	2,440	4,737		5,170
	Atas pelat				-1,264	-3,835	-0,313	-5,413
	Bawah pelat				-1,010	-2,449		-3,459



Gambar 5. 37 Tegangan Pada Saat Layan

Gambar A menunjukkan penampang komposit antara PCI girder dan pelat beton, Gambara B menunjukkan distribusi tegangan merata akibat gaya prategang langsung, Gambar C menunjukkan tegangan tambahan akibat eksentrisitas tendon, Gambar D menunjukkan tegangan akibat momen sekunder Ms dari sistem prategang, Gambar E menunjukkan tegangan akibat momen beban mati tambahan, Gambar F menunjukkan tegangan akibat momen beban hidup lajur, Gambara G menunjukkan tegangan akibat momen akibat beban lajur, dan Gambar H menunjukkan Berdasarkan tabel dan gambar diatas tegangan akhir selama masa layan adalah penjumlahan dari prestressing, eksentrisitas tendon, tegangan Ms, Tegangan Ma, tegangan M_{LL}, dan tegangan M_{AL}. Sehinga dapat diketahui bahwa tegangan akhir pasa saat layan adalah -22,804 MPa untuk serat atas dan -5,170 MPa untuk serat bawah. Serta tegangan akhir pada daerah penampang pelat saat layan adalah -5,413 MPa untuk serat atas dan -3,459 MPa untuk serat bawah.

5.3.6 Kapasitas Lentur Penampang

Perhitungan kapasitas lentur dilakukan pada kondisi momen maksimum, yang umumnya terjadi di tengah bentang. Adapun data-data yang dibutuhkan untuk menghitung kapasitas lentur penampang adalah sebagai berikut:

Tebal pelat t_s = 200 mm

Tinggi efektif penampang d_p $= h_{cg} - y_{mid}$

$= 2300 - 218{,}75$

$= 2081{,}25$ mm

Lebar sayap tekan b = s_g= 1400 mm

Kuat tekan beton gelagar f'_{cg} = 61,2 MPa

Luas strand A_{ps_tot} = 9485,564 mm^2

Tegangan putus baja prategang, f_{pu} =1860 MPa

Tegangan leleh baja prategang f_{py} = 1584 MPa

Koefisien friksi *wobble* k $= 2\left(1{,}04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}}\right)$

$= 2\left(1{,}04 - \frac{1584}{1860}\right)$

$= 0{,}377$

Faktor blok tegangan beton β_1 = 0,85

α_1 = 0,85

1. Kapasitas lentur

Perhitungan kapasitas lentur dimulai dengan menentukan apakah penampang bekerja sebagai persegi atau gelagar T. Untuk penampang persegi, sumbu netral berada di dalam badan penampang.

Letak sumbu netral penampang c $= \frac{A_{ps_{tot}} x f_{pu}}{0{,}85 \, . f'_c . \beta_1 . b + k . A_{ps} . \left(\frac{f_{pu}}{d_p}\right)}$

$= \frac{9485{,}564 \text{x} 1860}{0{,}85 \, .61{,}2.0{,}85.1400 + 0{,}377.9485{,}564. \left(\frac{1860}{2081{,}25}\right)}$

$= 271{,}025$ mm

Tinggi balok tekan ekivalen $\alpha = \beta_1 xc$

$= 0{,}85\text{x}271{,}025$

$= 230{,}371$ mm

Tegangan rata rata tendon prategang, $f_{ps} = f_{pu}.\left(1 - k.\frac{c}{d_p}\right)$

$= 1860.\left(1 - 0{,}377.\frac{271{,}025}{2081{,}25}\right)$

$= 1768{,}740$ MPa

Kapasitas lentur nominal pada tengah penampang, $M_n = A_{ps_{tot}}.f_{ps}.\left(d_p - \frac{a}{2}\right)$

$= 9485{,}564\text{x}1768{,}740.\left(2081{,}25 - \frac{230{,}371}{2}\right)\text{x}10^{-6}$

$= 32985{,}639$ kNm

Faktor reduksi lentur $\phi_f = 0{,}9$

Momen tahanan nominal penampang, $M_r = M_n x \phi_f$

$= 32985{,}639\text{x}0{,}9$

$= 29687{,}075$ kNm

Kapasitas lentur penampang diperiksa terhadap momen ultimit akibat kombinasi pembebanan kuat I yang dihitung sebagai berikut:

$M_u = 1{,}2\,.\left(M_{MS_G}\right) + 1{,}3\,.\left(M_{MS_D} + M_{MS_S}\right) + 2M_A + 1{,}8.M_{LL}$

$M_u = 22024{,}757$ kNm

Periksa kapasitas lentur penampang, $M_u \leq M_r$ OK

Karena nilai M_r (29687,075) lebih besar dari nilai M_u (22024,757 kNm) maka penampang mampu memikul beban yang bekerja.

2. Pemeriksaan tulangan minimum

Penentuan jumlah tendon harus mengikuti persyaratan, diaman niali $Mr \geq 1{,}33$ Mu atau $Mr \geq 1{,}2$ Mcr.

Momen tak terfaktor akibat beban mati komponen struktur:

$M_{dnc} = M_{MS_D} + M_{MS_S} + M_{MS_G}$

$= 415{,}078 + 2187{,}5 + 6722{,}656$

$= 9325{,}234$ kNm

Modulus retak beton $f_r = 0{,}63\ x\sqrt{f'_{cg}}$

$= 0{,}63\ \text{x}\sqrt{61{,}2}$

$= 4{,}928\ \text{MPa}$

Variabel faktor retak lentur $\Upsilon_1 = 1{,}6$

Variabel faktor prategang $\Upsilon_2 = 1{,}1$

Rasio kuat leleh dan kuat ultimit baja nonkomposit, $\Upsilon_3 = 1$

Tegangan tekan beton akibat gaya prategang efektif:

$$f_{cpe} = \frac{P_{eff}}{A_g} + \frac{P_{eff}.e_{mid}}{S_b}$$

$$= \frac{7765932{,}129}{8605\ \text{x}100} + \frac{7765932{,}129\text{x}799{,}366}{444171{,}769\ \text{x}1000}$$

$$= 23{,}001\ \text{MPa}$$

$$M_{cr} = \Upsilon_3.\left(\Upsilon_1.f_r + \Upsilon_2.f_{cpe}\right)S_{bcg} - M_{dcn}.\left(\frac{S_{bcg}}{S_b} - 1\right)$$

$$= 1.\left(1{,}6\text{x}4{,}928 + 1{,}1\text{x}23\right).645{,}33 - 9325{,}234.\left(\frac{645{,}33}{444{,}172} - 1\right)$$

$$= 17193{,}197\ \text{kNm}$$

$M_r = 29687{,}075\ \text{kNm}$

$1{,}2\ \text{x}M_{cr}$

$1{,}2\ \text{x}17193{,}197 = 20631{,}836\ \text{kNm}$

$1{,}33\ \text{x}M_u$

$1{,}33\ \text{x}22024{,}757 = 29292{,}926\ \text{kNm}$

Periksa persyaratan tulangan minimum, $1{,}2\ M_{cr} \leq M_r$ OK

5.3.7 Penulangan Balok Prategang

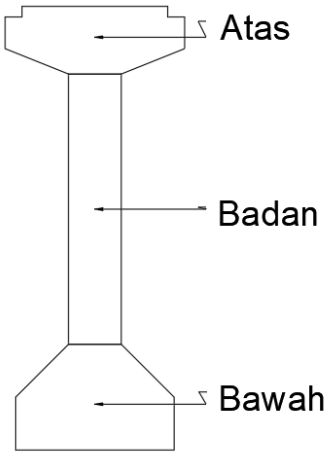
Fungsi utama tulangan longitudinal disini adalah sebagai pengikat tulangan geser, tanpa berkontribusi terhadap penulangan lentur. Kebutuhan jumlah dan dimensinya dapat ditentukan berdasarkan perhitungan berikut

Diameter tulangan yang digunakan D = 13 mm

Luas satu tulangan $A_{s1} = \frac{\pi}{D}\ x\ D^2$

$= 0{,}00013\ \text{mm}^2$

Perhitungan tulangan berdasarkan luas penampang tiap bagian gelagar yang terbagi menjadi 3 bagian seperti pada gambar berikut



Gambar 5. 38 Area Desain Tulangan Longitudinal

Luas tampang bagian bawah A_{bawah} = 0,3125 m^2

Luas tulangan bagian bawah $A_{s_bawah} = 50\%\ x\ A_{bawah}$

$= 50\%$ x 0,3125

$= 0{,}0015625\ \text{m}^2$

Jumlah tulangan bagian bawah $n = \frac{A_{s_{bawah}}}{A_{s1}}$

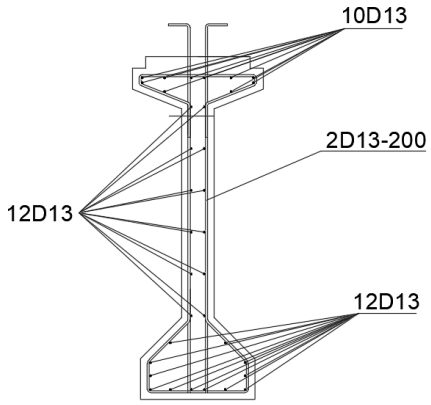
$= \frac{0{,}0015625}{0{,}00013}$

$= 12{,}0$

Tulangan bagian bawah digunakan 12-D13

Luas tampang bagian badan	A_{badan}	= 0,32 m^2
Luas tulangan bagian badan	A_{s_badan}	$= 50\% \; x \; A_{badan}$
		= 50% x 0,32
		= 0,0016 m^2
Jumlah tulangan bagian badan	n	= 12,31
Tulangan bagian badan digunakan	12-D13	
Luas tampang bagian atas	A_{atas}	= 0,228 m^2
Luas tulangan bagian atas	A_{s_atas}	$= 50\% \; x \; A_{atas}$
		= 50% x 0,228
		= 0,00114 m^2
Jumlah tulangan bagian atas	n	= 8,77
Tulangan bagian atas digunakan	10-D13	

Dari perhitungan diatas maka didapatkan hasil penulangan gelagar sebagai berikut.

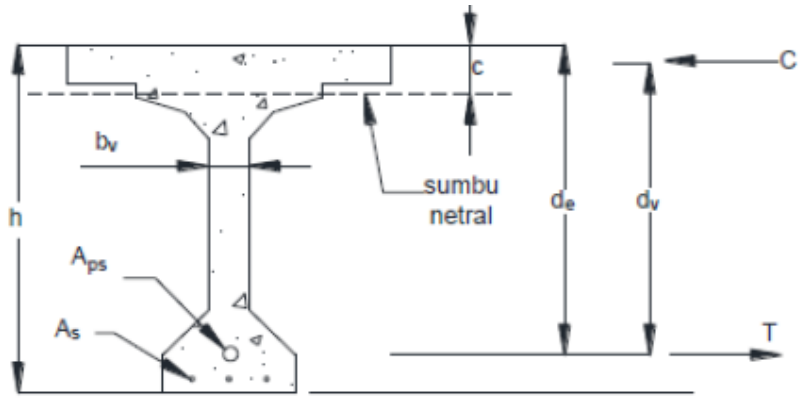


Gambar 5. 39 Penulangan Pada PCI Girder

5.3.8 Kapasitas Geser Penampang

Pemeriksaan kapasitas geser penampang dilakukan pada lokasi dengan intensitas gaya geser maksimum, dengan mengacu pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan Nomor 02/M/BM/2021 sebagai pedoman perencanaan. Wilayah di sekitar tumpuan merupakan area yang mengalami gaya lateral terbesar. Dalam subbab ini, pembahasan difokuskan pada perencanaan geser

gelagar prategang, baik tipe segmental maupun nonsegmental. Pada gelagar segmental, daerah antar sambungan harus dirancang dengan mempertimbangkan kapasitas geser sambungan pin apabila menggunakan sistem sambungan pin, atau kekuatan kunci geser apabila digunakan mekanisme pengunci geser. Perlu dicatat bahwa metode ini tidak berlaku untuk perencanaan geser pada sambungan antar gelagar. Perhitungan kapasitas geser dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.



Gambar 5. 40 Keterangan Variabel Perhitungan
(Sumber: Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No.02/M/BM/2021,2021)

Tinggi penampang h $= h_g + t_s$

$= 2100 + 200$

$= 2300$ mm

Selimut beton d_c = 40 mm

Tinggi efektif penampang d_e $= \frac{A_{ps}.f_{ps}.d_p}{A_{ps}.f_{ps}}$

$= \frac{9485{,}56 \text{ x } 1768{,}74 \text{x} 2081{,}25}{9485{,}56 \text{ x} 1768{,}74}$

$= 2081{,}25$ mm

Diameter tulangan geser D_s = 13 mm

Kuat leleh tulangan f_y = 420 MPa

Tinggi efektif geser d_v $= h_{cg} - a - y_{mid}$

$= 2300 - 230{,}37 - 218{,}75$

$= 1850{,}878$ mm

Lebar penampang geser b_v = 225 mm

Faktor reduksi kuat geser ϕ_v = 0,75

1. Kekuatan geser dari prategang

   Titik berat tendon di tumpuan y_{end} = 987,5 mm

   Titik berat tendon di tengah bentang y_{mid} = 218,75 mm

   Panjang setengah bentang L_{mid} = 25000 mm

   Panjang tendon di setengah bentang (asumsi linear), r_{tendon}

   $$= \sqrt{(y_{end} - y_{mid})^2 + L_{mid}^2}$$

   $$= \sqrt{(\,987{,}5 - 218{,}75)^2 + 25000^2}$$

   $$= 25011{,}817 \text{ mm}$$

   Gaya prategang efektif P_{ef} = 7765,932 kN

   Kontribusi gaya prategang terhadap ketahanan geser, V_p

   $$= P_{ef}\frac{y_{end} - y_{mid}}{r_{tendon}}$$

   $$= 7765{,}932\frac{987{,}5 - 218{,}75}{25011{,}817}$$

   $$= 238{,}689 \text{ kN}$$

2. Gaya dalam

   Gaya geser ultimit di tumpuan V_{ucr} = 871,981 kN

   Momen ultimit di tumpuan M_{ucr} = 10899,766 kNm

   Momen kombinasi kuat I di muka geser kritis tidak boleh kurang dari:

   $M_{ucr} > (V_{ucr} - V_p)\ x\ d_v$

   10899,766 > (871,981 – 238,689) x 1850,878

   10899,766 > 1172,146 OK

   Gaya aksial nominal N_u = 0 kN

3. Kekuatan geser dari beton

   Regangan longitudinal di baja tulangan, (jika $\varepsilon_s < 0$, maka dipakai 0)

$$\varepsilon_s = \frac{\frac{M_{ucr}}{d_v} + 0{,}5\,.N_u + \left(V_{ucr} - V_p\right) - A_{ps}.0{,}7.f_{pu}}{A_{ps}.E_{ps}}$$

$$= \frac{\frac{10899{,}766\text{x}10^6}{1850{,}878} + 0{,}5\,.0 + (871{,}981\ -\ 238{,}689)x10^3 - 9485{,}56x0{,}7x1860}{9485{,}56x197000}$$

$$= -0{,}00312$$

$\varepsilon_{s_pakai} = 0$

Faktor β(diasumsikan menggunakan tulangan minimum),

$$\beta = \frac{4{,}8}{1 + 750\,x\varepsilon_s}$$

$$= \frac{4{,}8}{1 + 750\,x0}$$

$$= 4{,}8$$

Sudut tegangan utama

$$\theta = 29 + 3500\,x\varepsilon_s$$

$$= 29 + 3500\,x0$$

$$= 29$$

Kuat geser beton

$$V_c = 0{,}083\,x\beta x\sqrt{f'_{cg}}xb_vxd_v$$

$$= 0{,}083\,x4{,}8x\sqrt{61{,}2}x225x1850{,}878$$

$$= 1297{,}942\ kN$$

Periksa apakah diperlukan tulangan geser

$V_{ucr} > 0{,}5$ x ϕ_v x $(V_c + V_p)$

871,981> 0,5 x 0,75 x (1297,942+ 238,689)

871,981 > 576,237 (Perlu)

4. Kebutuhan tulangan

Gaya geser yang ditahan baja tulangan,

$$V_{s_req} = \frac{V_{ucr}}{\phi_v} - V_c - V_p$$

$$= \frac{871{,}981}{0{,}75} - 1297{,}942 - 238{,}689$$

$$= -373{,}990\ \text{kN}$$

Diameter tulangan geser D_v = 13 mm

Jumlah kaki n_v = 2

Luas tulangan A_v $= \frac{1}{4}\ x\ \pi\ x\ D_v^2\ x\ n_v$

$= \frac{1}{4}$ x π x 13^2 x 2

$= 265{,}464$

Estimasi jarak tulangan S_v = 200 mm

Kekuatan geser tulangan V_s $= \frac{A_v x f_y x d_v (cot\theta)}{S_v}$

$= \frac{265{,}464 \text{x} 420 \text{x} 1850{,}878 (\cot 29)}{200}$

$= 1861{,}452$ kN

Kekuatan geser nominal V_{n1} $= V_C + V_S + V_P$

$= 1297{,}942 + 1861{,}452 + 238{,}689$

$= 3398{,}084$ kN

V_{n2} $= 0{,}25\ X\ f'_{cg} x b_v x d_v + V_p$

$= 0{,}25$ X 61,2x225x1850,878 + 238,689

$= 6610{,}339$ kN

Kekuatan geser nominal yang digunakan, V_n = 3398,084 kN

Periksa kapasitas geser

ϕ_v x $V_n \geq V_{ucr}$

0,75 x 3398,084 ≥ 871,981

2548,563 ≥ 871,981 OK

Perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas geser nominal gelagar masih dapat menahan gaya geser yang terjadi. Dengan demikian, dipilih tulangan geser D13-200 mm, dan selanjutnya dilakukan pengecekan terhadap jarak pemasangan tulangan untuk memastikan sesuai dengan spasi maksimum yang dipersyaratkan.

Tegangan geser di beton V_u $= \frac{[V_{ucr} - \phi_v x V_p]}{\phi_v x b_v x d_v}$

$= \frac{[871{,}981 - 0{,}75\text{x}238{,}689]}{0{,}75\text{x}225\text{x}1850{,}878}$

$= 2{,}219$ kN

Periksa kapasitas geser

$V_u < 0{,}125$ x f'_{cg}

2,219 < 0,125 x 61,2

2,219 < 7,65 MPa OK

Karena $v_u < 0{,}125$ x $f'_{cg,}$ maka syarat jarak maksimum adalah:

$S_{max} = 0{,}8$ x $d_v \leq 600$ mm

$= 0{,}8$ x $1850{,}878 \leq 600$ mm

$= 180 \leq 600$ mm

$= 600$ mm

Periksa spasi yang digunakan terhadap spasi maksimum

$S_v \leq S_{max}$

200 ≤ 600 mm (Aman)

Dapat disimpulkan, bahwa tulangan geser yang digunakan adalah 2D13-200 mm memenuhi syarat spasi maksimum yang diizinkan.

5.3.9 Desain Tulangan *Shear Connector*

Desain tulangan *shear connector* pada Perencanaan Ini Mengacu Pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/BM/2021. Berikut ini uraian perhitungan tulangan *shear connector.*

Lebar sayap atas gelagar b_{ui} = 600 mm

Jarak tulangan *shear connector* S_v = 200 mm

Jarak antar titik pusat tendon ke titik tengah tinggi pelat dek, d_{vi} $= h_g - y_{mid} + \frac{1}{2} x t_s$

$= 2100 - 218{,}75 + \frac{1}{2}$ x200

$= 1981{,}25$ mm

Gaya geser kombinasi Kuat I V_{ucr} = 1766,774 kN

Tegangan geser bidang antar muka	v_{ui}	$= \frac{V_{ucr}}{b_{ui} x d_{vi}}$
		$= \frac{1766774}{600\text{x}1981{,}25}$
		$= 1{,}486$ MPa
Gaya geser bidang antar muka	V_{ui}	$= v_{ui}\, x b_{ui}\, x S_v$
		$= 1{,}486$ x600 x200
		$= 178349{,}5$ kN
Faktor kohesi	C_i	= 1,9 MPa
Fraksi dari kuat beton menahan geser bidang antar muka,	K_1	= 0,3
Batasan ketahanan geser bidang antar muka,	K_2	= 12,4 MPa
Faktor friksi	μ	= 1
Gaya tekan permanen tegak lurus terhadap bidang geser,	P_c	= 0 kN
Kuat leleh tulangan	f_y	= 420 MPa
Jumlah tulangan per spasi teulangan geser,	n_{vi}	= 2
Diameter tulangan digunakan	D_{vi}	= 13 mm
Luas tulangan	A_{vf}	$= \frac{1}{4} . \pi . D_{vi}^2 . n_{vi}$
		$= \frac{1}{4} . \pi . 13^2 . 2$
		$= 265{,}465\ \text{mm}^2$
Luas bidang geser antar muka	A_{cv}	$= S_v\, x\, b_{ui}$
		$= 200$ x 600
		$= 120000\ \text{mm}^2$
Ketahanan geser antar muka	ϕV_{ni}	$= \phi_v [c_i . A_{cv} + \mu . (A_{vf} . f_y + P_c)]$
		$= 0{,}75[1{,}9\text{x}120000 + 1265{,}465\text{x}420 + 0)]$
		$= 254621{,}3$ kN

Periksa kapasitas geser

$V_{ui} \leq \phi V_{ni}$

178349,5 ≤ 254621,3 kN OK

Dengan demikian, shear connector yang digunakan adalah tulangan D13-200 mm, yang memiliki jarak sama dengan tulangan geser.

5.3.10 Kontrol Defleksi Balok Prategang

Defleksi pada balok prategang yang dianalisis mengacu pada Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan No. 02/M/BM/2021, di mana hanya defleksi akibat gaya prategang dan beban hidup yang dapat diperkirakan secara langsung. Sementara itu, defleksi jangka panjang tidak dicakup dalam pedoman tersebut. Perhitungan defleksi balok prategang dapat dijelaskan melalui tahapan-tahapan berikut.

1. Defleksi akibat prategang pada saat transfer

Gaya prategang saat transfer	P_{trans}	= 11624,084 kN
Eksentrisitas tendon di tengah bentang,	e_{mid}	= 799,366 mm
Eksentrisitas tendon di tumpuan,	e_{end}	= 30,616 mm
Modulus elastisitas gelagar saat transfer,	E_{cig}	= 32886,569 MPa
Momen inersia gelagar nonkomposit,	I_g	= 45221822,1 x 10^4 mm
Momen inersia gelagar komposit,	I_{cg}	= 84426974 x 10^4 mm
Panjang Jembatan	L_b	= 50000 mm

Deformasi akibat prategang

$$\Delta_p = \frac{P_{trans}}{E_{cig}\ x\ I_g} \cdot \left[\frac{e_{mid} \cdot L_b}{8} - \frac{(e_{mid} - e_{end}) \left(\frac{L_b}{2}\right)^2}{6} \right]$$

$$= \frac{11624{,}084}{32886{,}569 \text{ x } 45221822{,}1 \text{ x } 10^4} \text{x} \left[\frac{799{,}366.50000}{8} - \frac{(799{,}366 - 30{,}616)\left(\frac{50000}{2}\right)^2}{6} \right]$$

$$= 257{,}839 \text{ mm}$$

2. Defleksi akibat berat sendiri gelagar saat transfer

Beban akibat gelagar W_g = 21,513 kN/m

Deformasi akibat beban gelagar Δ_g

$$= \frac{5 \; x \; W_g x \; L_b^2}{384 \; x \; E_{cig} x I_g}$$

$$= \frac{5 \text{ x } 21{,}513 \text{x } 50000^2}{384 \text{ x } 32886{,}569 \text{x} 45221822{,}1 \text{ x } 10^4}$$

$$= 117{,}718 \text{ mm}$$

3. Defleksi akibat berat pelat dan diafragma

Beban mati penampang nonkomposit, W_{Dcn}

$$= W_s + W_{dp}$$

$$= 7 + 1328$$

$$= 8{,}328 \text{ kN/m}$$

Deformasi saat konstruksi Δ_{Dcn}

$$= \frac{5 \; x \; W_{Dcn} x L_b^4}{384 \; x \; E_{cig} x I_g}$$

$$= \frac{5 \text{ x } 8{,}328 \text{x} 50000^4}{384 \text{ x } 32886{,}57 \text{x} 45221822{,}1 \text{x} 10^4}$$

$$= 45{,}573 \text{ mm}$$

4. Defleksi akibat berat mati tambahan

Beban mati penampang komposit, W_{Dc}

$$= W_a + W_h + W_{br} + W_{tr}$$

$$= 1{,}54 + 0{,}686 + 1{,}875 + 0{,}9375$$

$$= 5{,}038 \text{ kN/m}$$

Deformasi akibat beban mati saat komposit, Δ_{Dc}

$$= \frac{5\ x\ W_{Dc} x L_b^4}{384\ x\ E_{cig} x I_g}$$

$$= \frac{5 \text{ x } 5{,}038 \text{x} 50000^4}{384 \text{ x } 32886{,}57 \text{x} 45221822{,}1 \text{x} 10^4}$$

$$= 27{,}571 \text{ mm}$$

5. Resume camber

Camber setelah transfer Δ_{aftr_trans}

$$= \Delta_p - \Delta_g$$

$$= 257{,}839 - 117{,}718$$

$$= 140{,}121 \text{ mm}$$

Faktor pengaruh waktu pada camber saat konstruksi, F_c = 1,8

Faktor pengaruh waktu defleksi saat konstruksi, F_d = 1,85

Total defleksi saat konstruksi Δ_{kons}

$$= \Delta_p x f_c - \Delta_g x f_d$$

$$= 257{,}839 \text{x} 1{,}8 - 117{,}718 \text{x} 1{,}85$$

$$= 246{,}331 \text{ mm}$$

6. Defleksi akibat beban hidup kendaraan

Beban hidup BTR W_{BTR} =10,08 kN/m

Beban hidup BGT W_{BGT} = 96,04 kN/m

Deformasi akibat beban BTR penampang komposit, Δ_{BTR}

$$= \frac{5\ x\ W_{BTR} x L_b^4}{384\ x\ E_{cg} x I_{cg}}$$

$$= \frac{5 \text{ x } 10{,}08 \text{x} 50000^4}{384 \text{ x } 36768{,}3 \text{x} 84426974 \text{ x} 10^4}$$

$$= 26{,}426 \text{ mm}$$

Deformasi akibat beban BGT penampang komposit, Δ_{BGT}

$$= \frac{5\ x\ W_{BGT} x L_b^3}{48\ x\ E_{cig} x I_g}$$

$$= \frac{5 \text{ x } 96{,}04 \text{x} 50000^3}{384 \text{ x } 36768{,}3 \text{x} 84426974 \text{ x} 10^4}$$

$$= 0{,}0402 \text{ mm}$$

Total deformasi beban hidup $\Delta_{LL} = \Delta_{BTR} + \Delta_{BGT}$

$= 26{,}426 + 0{,}0402$

$= 26{,}466$ mm

Syarat batas defleksi akibat beban lalu lintas, $\Delta_{LL_allow} = \frac{l_B}{800}$

$= \frac{50000}{800}$

$= 62{,}5$ mm

Periksa terhada syarat

$\Delta_{LL} \leq \Delta_{LL_allow}$

$26{,}466 \leq 62{,}5$ OK

Hasil perhitungan diatas menunjukkan bahwa defleksi yang terjadi masih aman terhadap defleksi yang disyaratkan.

5.3.11 Desain Tulangan *Bursting*

Perencanaan tulangan untuk gaya bursting pada balok prategang mengacu pada ketentuan yang terdapat dalam RSNI-T-12-2004. Gaya bursting merupakan gaya transversal yang timbul akibat penyebaran gaya prategang dari tendon ke dalam beton di sekitar area angkur. Gaya ini bersifat tegangan tarik lateral yang dapat menyababkan retak atau kerusakan pada beton, sehingga diperlukan tulangan khusus untuk menahannya. Desain tulangan bursting dilakukan dengan memperhitungkan besarnya gaya tarik transversal maksimum yang terjadi di sekitar zona transfer gaya (zona angkur). Perhitungan gaya bursting dan kebutuhan tulangan dapat dirinci sebagai berikut.

1. Penentuan gaya prategang akibat jacking pada masing masing tendon

   Luas satu starnd A_{stand} = 182,415 mm^2

   Jumlah strand keseluruhan n_s = 52

   Tegangan baja prategang saat jacking f_{pbt} = 1395 MPa

   Gaya prategang akibat jacking pada masing masing tendon, $P_j = A_{strand}\ x\ n_i x f_{pbt}$

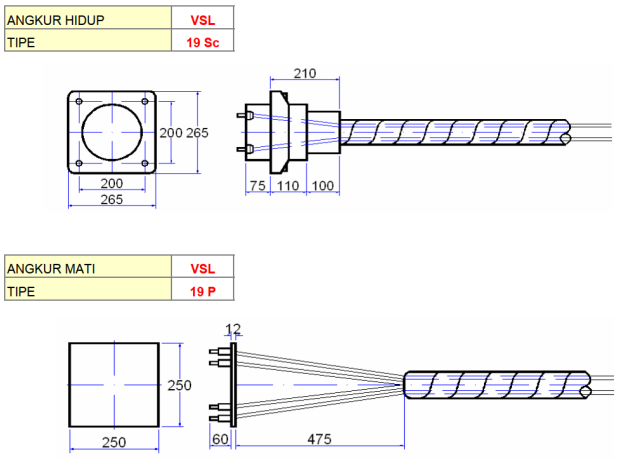
Hasil perhitungan gaya prategang saat jacking pada tiap tendon dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 5. 37 Hasil Perhitungan Gaya Prategang Jacking Pada Tiap Tendon

No Tendon	n_i Strand	A_{strand} mm^2	P_j kN	Sudut angkur
1	13	182,415	3308,09	5,959
2	13	182,415	3308,09	5,157
3	13	182,415	3308,09	2,178
4	13	182,415	3308,09	0,802

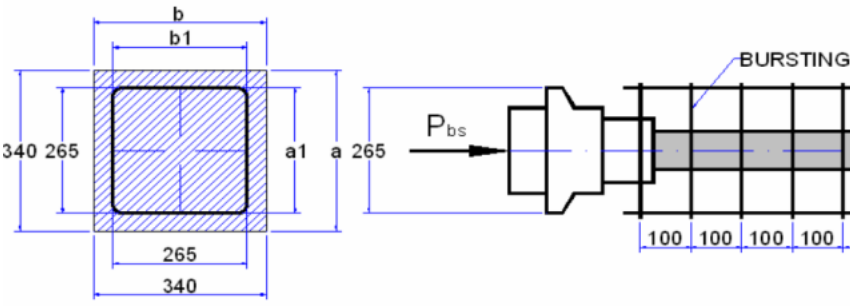
2. Perhitungan Sengkang Untuk *Bursting Force*

Pada perencanaan ini angkur yang digunakan adala tipe VSL. Berikut ini merupakan detail dimensi yang digunakan.



Gambar 5. 41 Dimensi dan Tipe Angkur

Desain sengkang dihitung dengan mempertimbangkan dimensi pelat angkur yang tertera pada gambar berikut ini.



Gambar 5. 42 Dimensi Pelat Angkur

Perhitungan sengkang untuk *bursting force* adalah sebagai berikut.

Rasio perbandingan lebar pelat angkur untuk sengkang arah vertikal, $r_a = {a_1}/{a}$

Rasio perbandingan lebar pelat angkur untuk sengkang arah horizontal, $r_b = {b_1}/{b}$

Bursting force untuk sengkang arah vertikal, $P_{bta} = 0{,}3\ x\ (1 - r_a) x\ P_j$

Bursting force untuk sengkang arah horizontal, $P_{btb} = 0{,}3\ x\ (1 - r_b) x\ P_j$

Luas tulangan sengkang arah vertikal yang diperlukan, $A_{ra} = \dfrac{P_{bta}}{0{,}85\ x\ f_s}$

Luas tulangan sengkang arah horizontal yang diperlukan, $A_{rb} = \dfrac{P_{btb}}{0{,}85\ x\ f_s}$

Tegangan leleh baja sengkang f_y = 420000 kPa

Tegangan izin baja sengkang $f_s = 0{,}578\ x\ f_y$

digunakan sengkang tertutup 2D13 mm

Luas penampang sengkang

$$A_s = 2x\frac{\pi}{4}xD^2$$
$$= 2x\frac{\pi}{4}x13^2$$
$$= 0{,}000265\ \text{m}^2$$

Jumlah sengkang arah vertikal yang diperlukan, $n_a = {A_{ra}}/{A_s}$

Jumlah sengkang arah horizontal $n_b = {}^{A_{rb}}/_{A_s}$ yang diperlukan,

Hasil perhitungan mengguanakan persamaan persamaan diatas adalah sebagai berikut.

Tabel 5. 38 Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Sengkang Arah Vertikal

No Tendon	P_j (kN)	a_1 (mm)	a (mm)	ra	P_{bta} (kPa)	A_{ra} (m^2)	Jumlah Sengkang
1	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795
2	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795
3	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795
4	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795

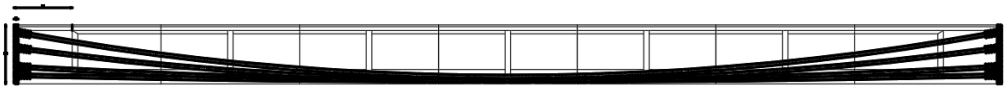
Tabel 5. 39 Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Sengkang Arah Horizontal

No Tendon	P_j (kN)	b_1 (mm)	b (mm)	rb	P_{btb} (kPa)	A_{rb} (m^2)	Jumlah Sengkang
1	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795
2	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795
3	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795
4	3308,09	250	340	0,735	262,701	0,001273	4,795

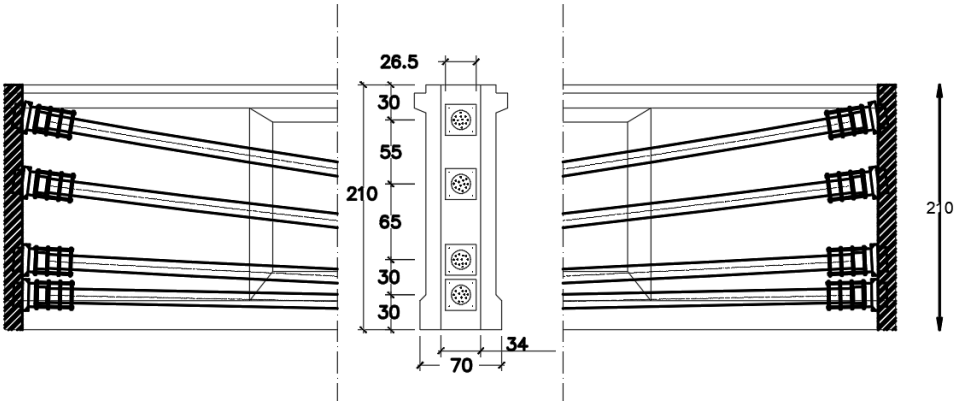
Tabel 5. 40 Kesimpulan Sengkang Untuk *Bursting force*

No Tendon	Angkur Hidup		Angkur Mati VSL		Jumlah Sengkang
	Sc (ton)	Dim (mm)	*P* (ton)	Dim (mm)	
1	19	265	19	250	5
2	19	265	19	250	5
3	19	265	19	250	5
4	19	265	19	250	5

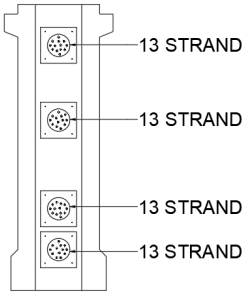
Dengan demikian penulangang sengkang untuk *bursting force* dapat dilihat sebagai berikut.



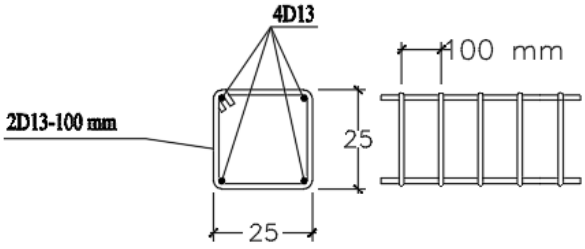
Gambar 5. 43 Posisi Tendon Memanjang



Gambar 5. 44 Detail Angkur dan Tendon Pada Tumpuan



Gambar 5. 45 Kebutuhan Strand



Gambar 5. 46 Penulangan *Bursting*

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis perhitungan pada perencanaan jembatan Perning Kloji yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Pembebanan pada perencanaan ini mencakup beban sendiri (beban pelat dan beban gelagar + diafragma), beban mati tambahan (beban aspal, air hujan, barrier, dan trotoar) beban lalu lintas (beban lajur dan beban rem), beban angin, dan beban pejalan kaki.
   a. Pembebanan pada pelat jembatan terdiri dari beban mati sendiri pelat (W_s) sebesar 5 kN/m, beban aspal dan air hujan (W_a) sebesar 1,59 kN/m , beban barrier (W_{br}) sebesar 7,5 kN, beban trotoar (W_{tr}) sebesar 3,75 kN/m, beban truk (P_T) sebesar 157,5 kN, beban angin kendaraan (P_{EW}) sebesar 6,758 kN, dan beban pejalan kaki (W_{TP}) sebesar 5kN/m.
   b. Pembebanan pada gelagar jembatan terdiri dari beban pelat (W_s) sebesar 7 kN/m, beban gelagar (W_g) sebesar 21,858 kN/m, beban diafragma (W_{dp}) sebesar 1,328 kN/m, beban aspal (W_a) sebesar 1,54 kN/m, beban genangan air hujan (W_h) sebesar 0,686 kN/m, beban barrier (W_{br}) sebesar 1,875 kN/m, dan beban trotoar (W_{tr}) sebesar 0,9375 kN/m.
2. Gelagar jembatan terdiri dari 1 bentang dengan panjang 50 m. Jenis gelagar yang digunkan yaitu *Prestressed Concrete I-Girder* H-210 dengan jarak antar girder 1,4 m dan mutu girder f'c = 61,2 MPa. Diafragma yang dipasang pada girder adalah sebanyak 7 buah. Pada setiap gelagar direncankan menggunakan 4 tendon dengan komposisi *strand* pada setiap tendonnya sebanyak 13 buah. Jenis strand yang digunakan adalah *Uncoated stress relieve seven wires strand ASTM A416 Grade 270 Low Relaxation*.

3. Penulagan yang dapat menahan gaya – gaya yang bekerja pada struktur atas jembatan Perning Kloji dirinci sebagai berikut
    a. Pada pelat jembatan beton bertulang dengan ketebalan 200 mm digunakan tulangan pokok D16-120 dan tulangan bagi D13-120.
    b. Pada gelagar jembatan, tulangan geser dan *shear connector* digunakan 2D13-200 mm, untuk tulangan longitudinal digunakan 34D13. Untuk penyangga *brusting*, digunakan sengkang berukuran 2D13-100 mm.

6.2 Saran

Dari kesimpulan diatas, berikut ini beberapa saran untuk melengkapi kekurangan dari penelitian ini dan sebagai acuan pada penelitian selanjutnya.

1. Diperluka penelitian lebih lanjut terhadap berbagai jenis jembatan untuk menentukan tipe yang paling efektif. Selain penggunaan PCI Girder, penelitian juga sebaiknya mencakup eksplorasi material alternatif, seperti baja maupun komposit, sebagai elemen struktur utama.
2. Penelitian ini belum meninjau kondisi gelagar tepi yang berperilaku kantilever, sehingga untuk penelitian selanjutnya dibutuhkan menghitung pembebanan lebih detail baik ada gelagar tengah maupun tepi dalam rangka menentukan momen terbesar.
3. Fokus penelitian ini tidak meliputi struktur bawah, antara lain abutment dan fondasi, sehingga diperlukan analisis lebih menyeluruh terhadap keseluruhan struktur utama jembatan.
4. Penelitian ini tidak mempertimbangkan rencana anggaran biaya (RAB) dan rencana anggaran pelaksanaan (RAP), sehingga diperlukan perhitungan menyeluruh untuk mendapatkan perbandingan biaya yang akan digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

AASHTO. (2017). *LRFD Bridge Design Specification* (8 ed.). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC. https://doi.org/10.1201/b15616

Aboe, A.K. (2006). Diktat *Struktur Beton Prategang*. Yogyakarta.

Al Ikhsan, A. I., Pribadi, J. A., & Puluhulawa, N. (2019). Desain Jembatan Sungai Meskom Menggunakan Girder Prategang. *Jurnal TeKLA*, *1*(1), 38. https://doi.org/10.35314/tekla.v1i1.1227

Apriyanto, D. (2021). Perencanaan Girder Jembatan Beton Prategang Jl. Raya Sememi Benowo Surabaya Section 0-152. *Jurnal Rekayasa dan Manajemen Konstruksi*, *9*(1), 35–40.

Badan Standardisasi Nasional Indonesia. (2004). *Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan, RSNI-T12-2004*. Jakarta:BSN.

Barker Richard, M., & Puckett, J. A. (2007). Bridge Engineering. In *Bridge Engineering*. John Wiley and Sons. https://doi.org/10.5772/intechopen.70024

Christandy Hardiyatmo, H. (2007). *Perencanaan Jembatan*.

E Bowles, J. (1997). *Foundation Analysis and Design*. McGraw-Hill Education.

Fah Chen, W., & Duan, L. (1999). *Bridge Engineering Handbook*.

G Nawi, E. (2001). *Bridge Engineering: Design, Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges*. McGraw Hill education.

J Struyk, H., & Der Veen, V. (1984). *Jembatan*.

J Zhao, J., & E Tonias, D. (2012). *Bridge Engineering*.

M Das, B. (2011). *Principles of Foundation Engineering*. Cengage Learning.

Mayandra, I., D-iv, P. S., Perancangan, T., Dan, J., Sipil, J. T., & Bengkalis, P. N. (2021). *Jembatan Sungai Mesim Menggunakan Pci Girder Berdasarkan Pembebanan Sni 1725-*.

Nusantoro, A., Widyananto, E., Alami, N., Dian, P., & Prabuningrat, I. (2022). Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo dengan

Menggunakan PCI Girder. *Jurnal Surya Beton*, *6*(1), 1–8. http://jurnal.umpwr.ac.id/index.php/suryabeton

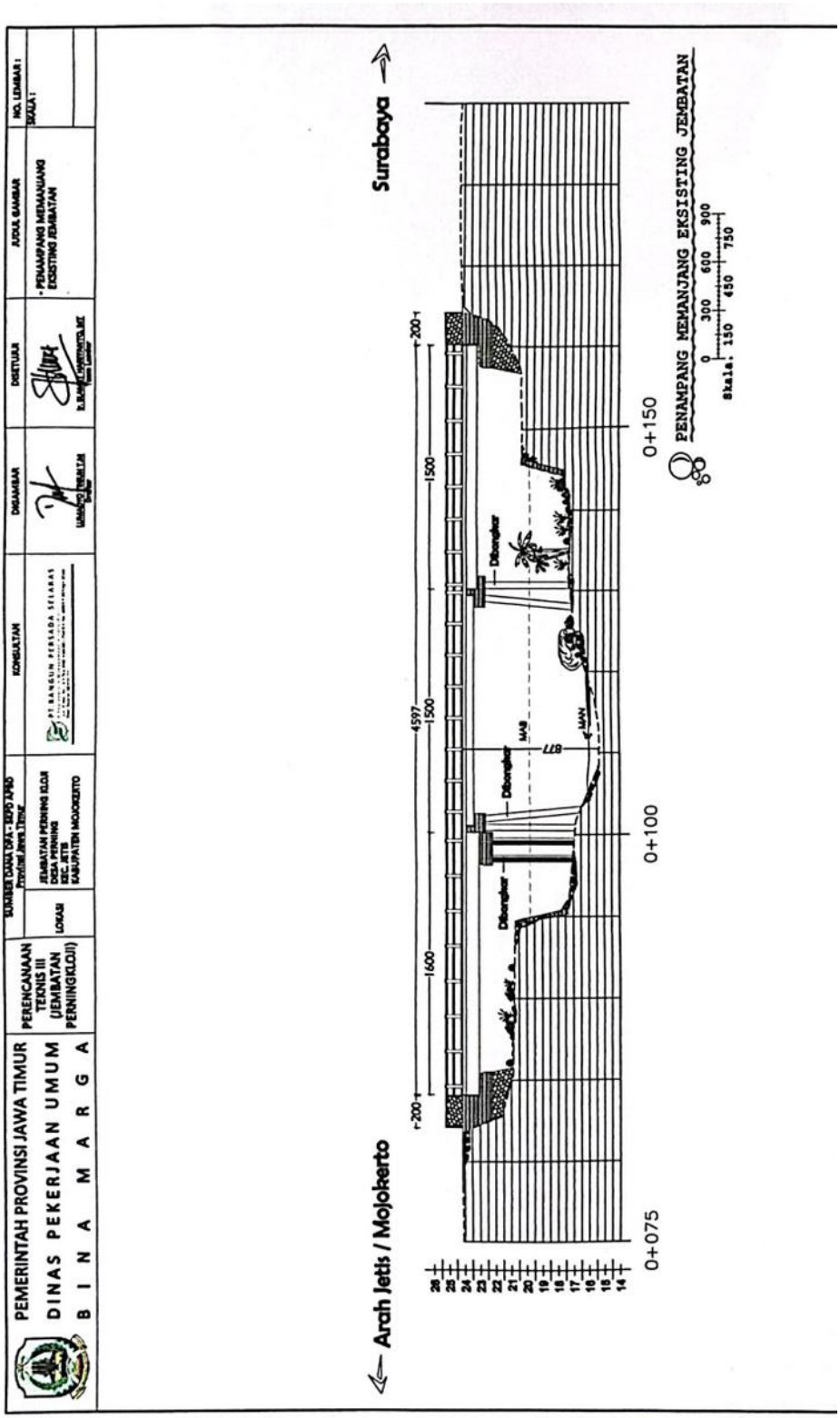
S Troitsky, M. (1994). *Planning and Design of Bridges*.

Supriyadi, B., & Muntohar Setyo, A. (2007). *Jembatan*.

Suseno, R. (2023). *Perancangan Ulang Jembatan Bae–Besito (Karangsambung) Dengan Pci-Girder (Redesign Of Bae–Besito (Karangsambung) Bridge With PCI-Girder)*. https://dspace.uii.ac.id/handle/123456789/42355

LAMPIRAN

Lampiran 1 Eksisting Jembatan Perning Kloji



Lampiran 2 Spesifikasi PCI Girder WIKA Beton

POST-TENSION PC-I GIRDER **SPECIFICATION**

Span (m)	PCIH-90cm				PCIH-125cm				PCIH-160cm				PCIH-170cm				PCIH-210cm			
	Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)			Beam Spacing / fc'	Beam Support Reaction (kN)		
	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	Vult	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	Vult	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	Vult	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	Vult	(cm / MPa)	V_{DL}	V_{LL}	Vult
10	185 / 40	117	179	476																
11	185 / 40	128	187	505																
12	185 / 40	138	196	533																
13	185 / 40	151	204	565																
14	185 / 40	161	212	594																
15	185 / 40	171	221	622																
16	140 / 40	150	173	508	185 / 40	200	229	673												
17					185 / 40	211	237	702												
18					185 / 40	222	245	731												
19					185 / 40	233	254	761												
20					185 / 40	244	262	790												
21					185 / 40	255	270	820												
22					140 / 50	225	211	672	185 / 40	318	279	913								
23					140 / 60	234	217	695	185 / 40	331	287	945								
24									185 / 40	344	295	976								
25									185 / 40	357	304	1008								
26									185 / 40	370	312	1040								
27									185 / 40	383	320	1072								
28									185 / 40	396	329	1104								
29									185 / 40	419	337	1148								
30									140 / 50	369	261	944	185 / 40	432	345	1180				
31									140 / 50	381	264	964	185 / 40	445	349	1204				
32													185 / 40	517	354	1297				
33													185 / 40	532	358	1324				
34													185 / 40	546	362	1350				
35													185 / 50	561	366	1377	185 / 40	607	366	1432
36													185 / 60	576	370	1403	185 / 40	623	370	1460
37													185 / 60	591	374	1429	185 / 40	639	374	1487
38													185 / 60	606	378	1456	185 / 40	655	378	1515
39													140 / 60	589	289	1265	185 / 40	671	382	1542
40													140 / 60	603	292	1289	185 / 50	686	386	1570
41													140 / 60	620	297	1318	185 / 50	705	392	1604
42																	185 / 50	721	396	1632
43																	185 / 50	750	400	1675
44																	185 / 60	766	404	1703
45																	185 / 60	782	408	1730
46																	140 / 60	700	312	1446
47																	140 / 60	714	315	1469
48																	140 / 60	728	318	1493
49																	140 / 60	742	322	1516
50																	140 / 70	756	325	1540

Note : Based on bridge load refer to SNI 1725:2016 and assume bridge cross section parameter : 200mm for CIP Slab, 70mm concrete deck slab and 50mm asphaltic layer

Lampiran 3 Mutu Beton Dan Jumlah Segmen PCI Girder WIKA Beton

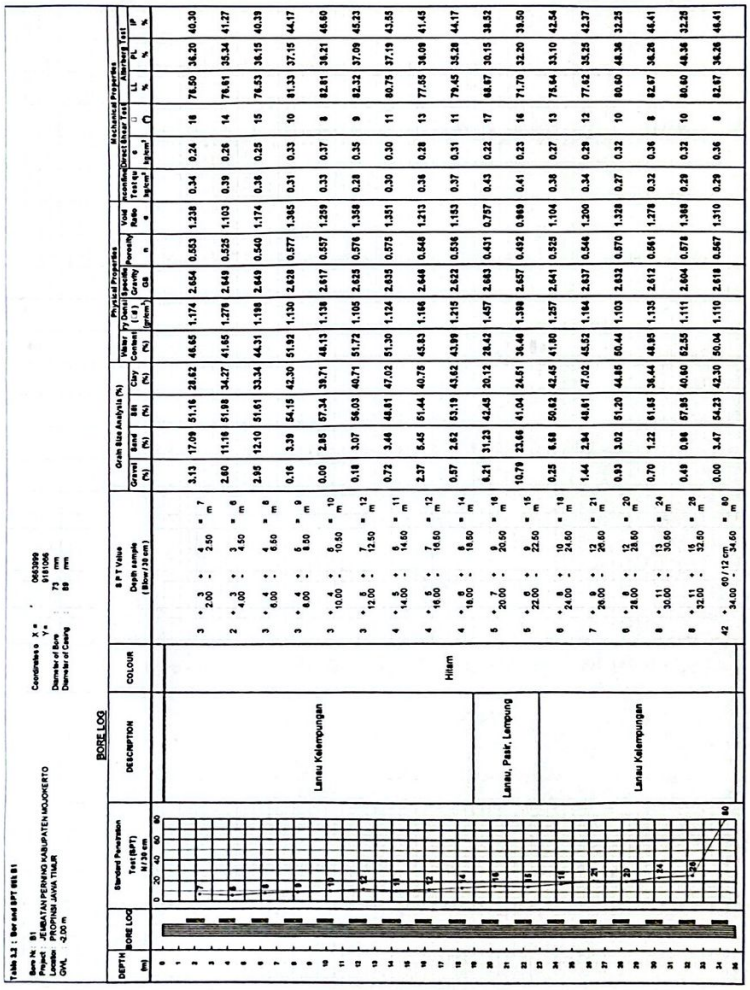
No.	Uraian	Mutu beton fc' (Mpa)	Jumlah Segmen
7	PCI Girder H-170 cm ; L-36,8 m ; Ctc-185 cm	45	5
8	PCI Girder H-170 cm ; L-37,8 m ; Ctc-185 cm	45	5
9	PCI Girder H-170 cm ; L-38,8 m ; Ctc-185 cm	50	5
10	PCI Girder H-170 cm ; L-39,8 m ; Ctc-140 cm	45	5
11	PCI Girder H-170 cm ; L-40,8 m ; Ctc-140 cm	45	5
12	PCI Girder H-170 cm ; L-41,8 m ; Ctc-140 cm	50	5
E	PCI GIRDER POSTENSION SEGMENTAL H-210 cm		
1	PCI Girder H-210 cm ; L-35,8 m ; Ctc-185 cm	45	5
2	PCI Girder H-210 cm ; L-36,8 m ; Ctc-185 cm	45	5
3	PCI Girder H-210 cm ; L-37,8 m ; Ctc-185 cm	45	5
4	PCI Girder H-210 cm ; L-38,8 m ; Ctc-185 cm	50	5
5	PCI Girder H-210 cm ; L-39,8 m ; Ctc-185 cm	45	5
6	PCI Girder H-210 cm ; L-40,8 m ; Ctc-185 cm	45	5
7	PCI Girder H-210 cm ; L-41,8 m ; Ctc-185 cm	45	7
8	PCI Girder H-210 cm ; L-42,8 m ; Ctc-185 cm	45	7
9	PCI Girder H-210 cm ; L-43,8 m ; Ctc-185 cm	50	7
10	PCI Girder H-210 cm ; L-44,8 m ; Ctc-185 cm	50	7
11	PCI Girder H-210 cm ; L-45,8 m ; Ctc-185 cm	50	7
12	PCI Girder H-210 cm ; L-46,8 m ; Ctc-140 cm	45	7
13	PCI Girder H-210 cm ; L-47,8 m ; Ctc-140 cm	45	7
14	PCI Girder H-210 cm ; L-48,8 m ; Ctc-140 cm	50	7
15	PCI Girder H-210 cm ; L-49,8 m ; Ctc-140 cm	50	7
16	PCI Girder H-210 cm ; L-50,8 m ; Ctc-140 cm	60	7

Scanned with CamScanner

Lampiran 4 Data Penyidikan Tanah

ANALISA DATA PENYELIDIKAN TANAH

JEMBATAN PERNING KLOJI KABUPATEN MOJOKERTO

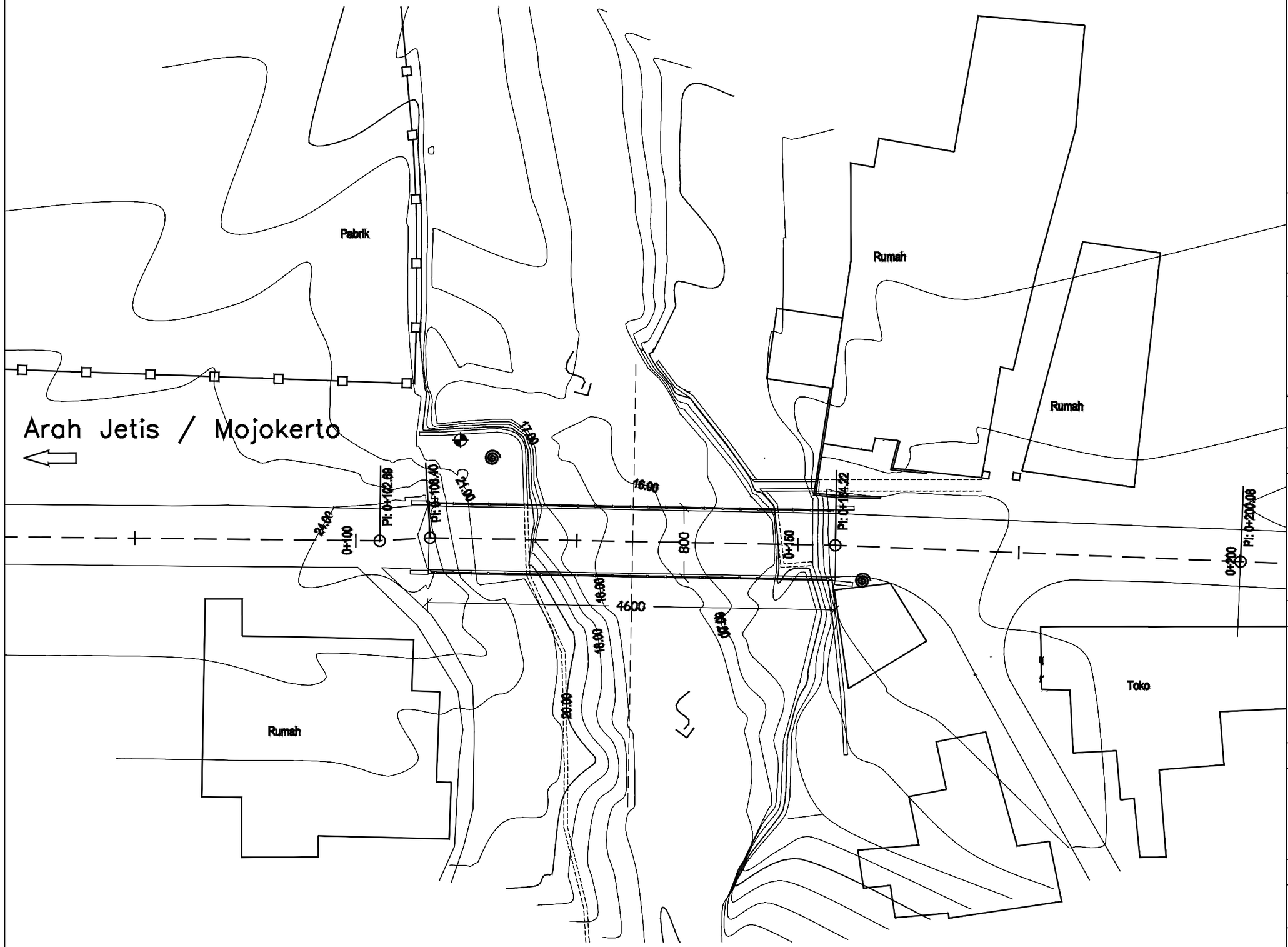


PT. BANGUN PERSADA SELARAS

Lampiran 5 Lokasi Perencanaan Jembatan



Lampiran 6 Hasil Perencanaan



UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

TUGAS AKHIR

PERENCANAAN ULANG JEMBATAN PERNING KLOJI DI MOJKERTO MENGGUNAKAN *PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER*

DOSEN PEMBIMBING

Ir. SUHARYATMA, M.T.

DIBUAT OLEH

RIFDATUN NABILAH
20511243

JUDUL GAMBAR

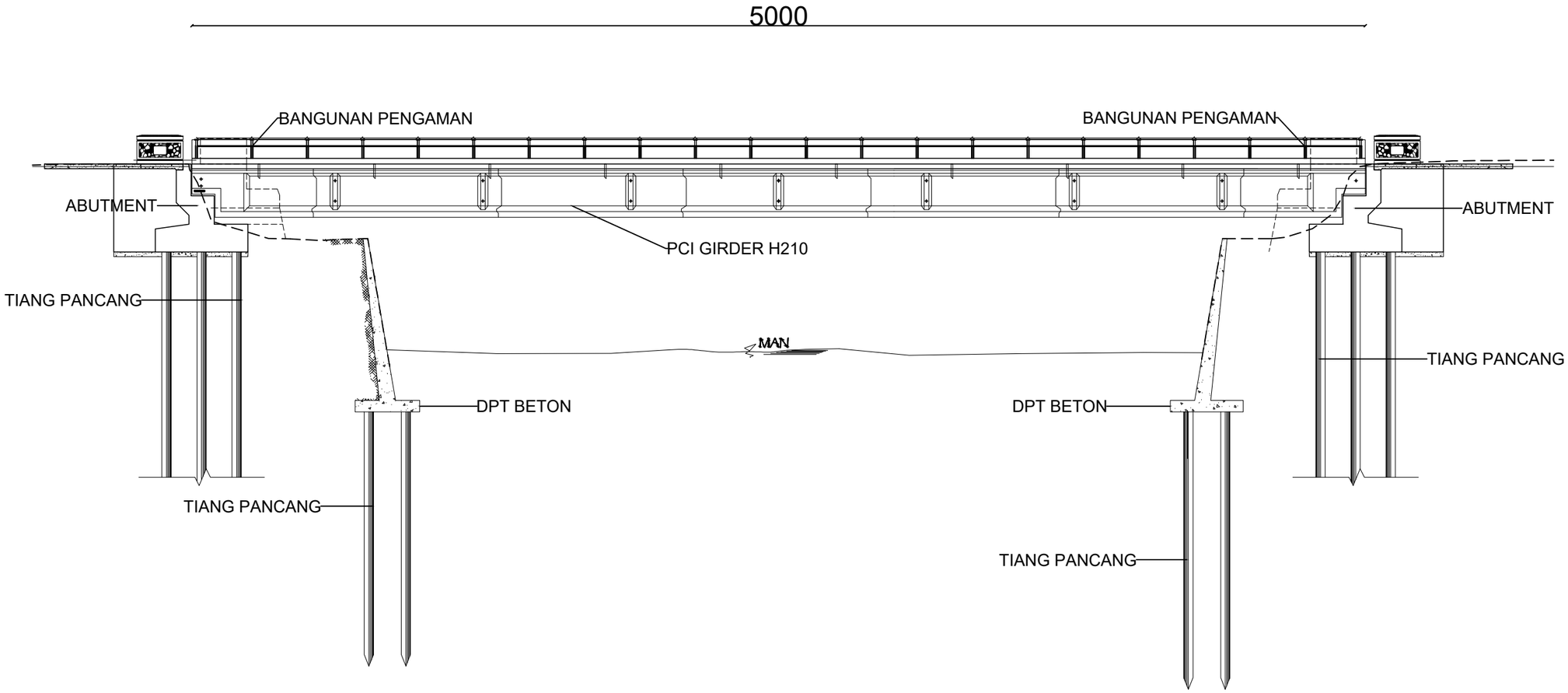
TOPOGRAFI AREA JEMBATAN

HALAMAN

1

TANGGAL

6 NOVEMBER 2025



TAMPAK MEMANJANG JEMBATAN

SKALA 1:200

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

TUGAS AKHIR

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN PERNING KLOJI DI MOJKERTO MENGGUNAKAN *PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER*

DOSEN PEMBIMBING

Ir. SUHARYATMA, M.T.

DIBUAT OLEH

RIFDATUN NABILAH
20511243

JUDUL GAMBAR

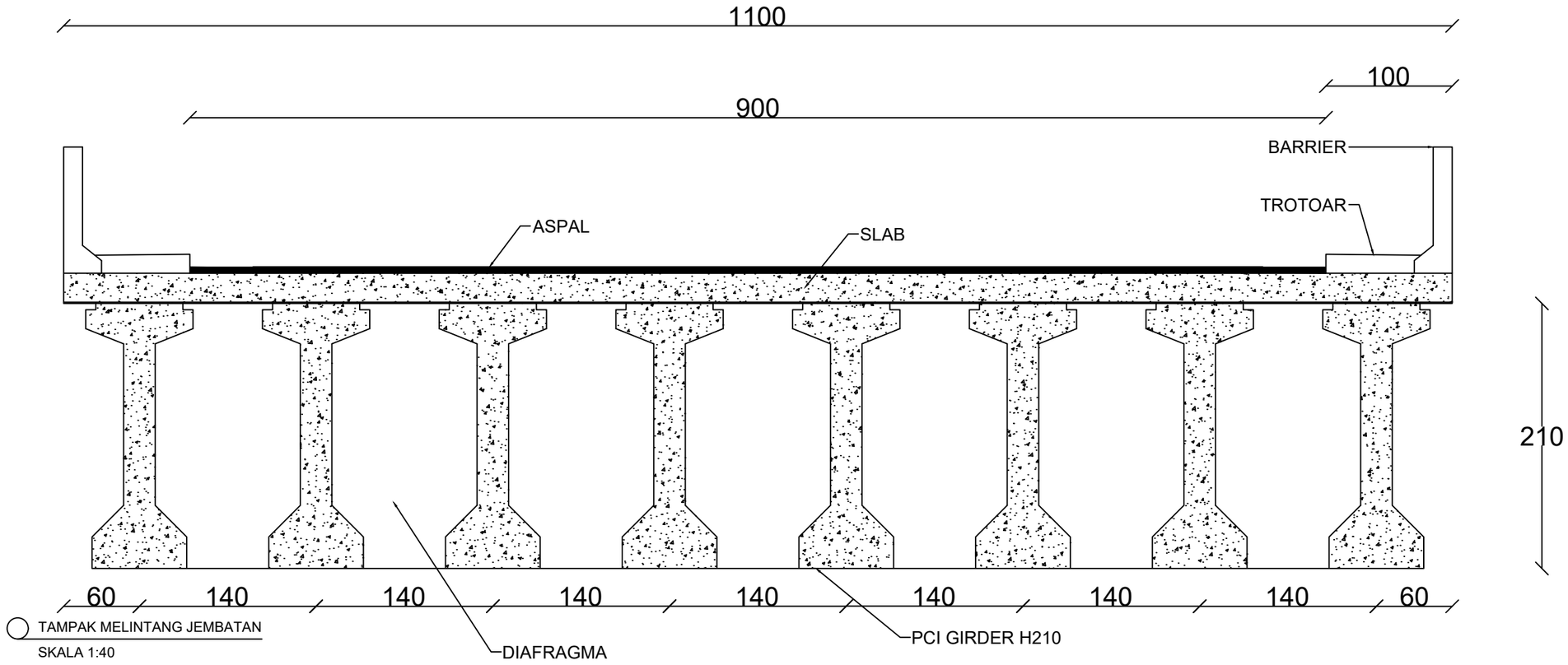
POTONGAN MEMANJANG JEMBATAN

HALAMAN

2

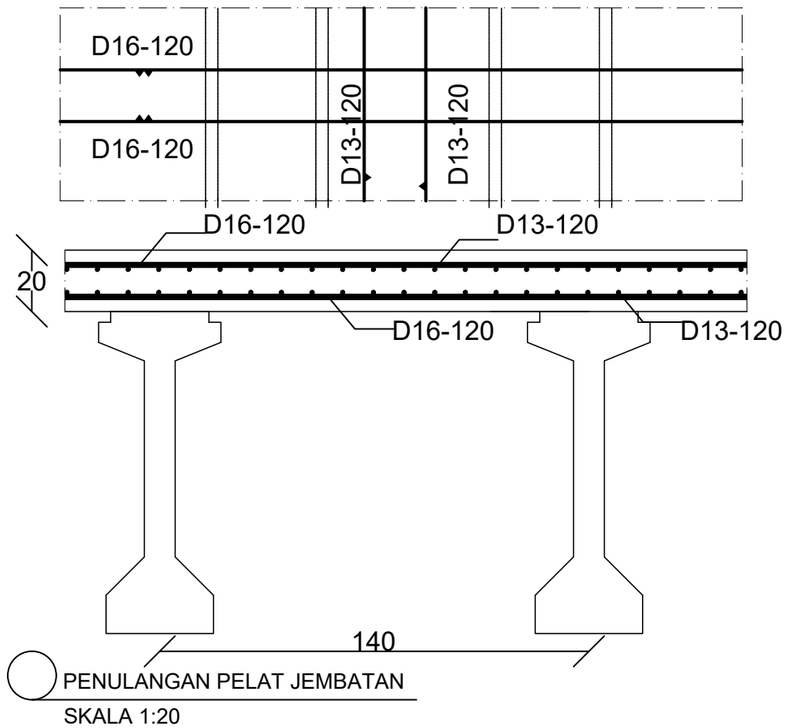
TANGGAL

6 NOVEMBER 2025



TAMPAK MELINTANG JEMBATAN

SKALA 1:40



PENULANGAN PELAT JEMBATAN

SKALA 1:20

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

TUGAS AKHIR

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN PERNING KLOJI DI MOJKERTO MENGGUNAKAN *PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER*

DOSEN PEMBIMBING

Ir. SUHARYATMA, M.T.

DIBUAT OLEH

RIFDATUN NABILAH
20511243

JUDUL GAMBAR

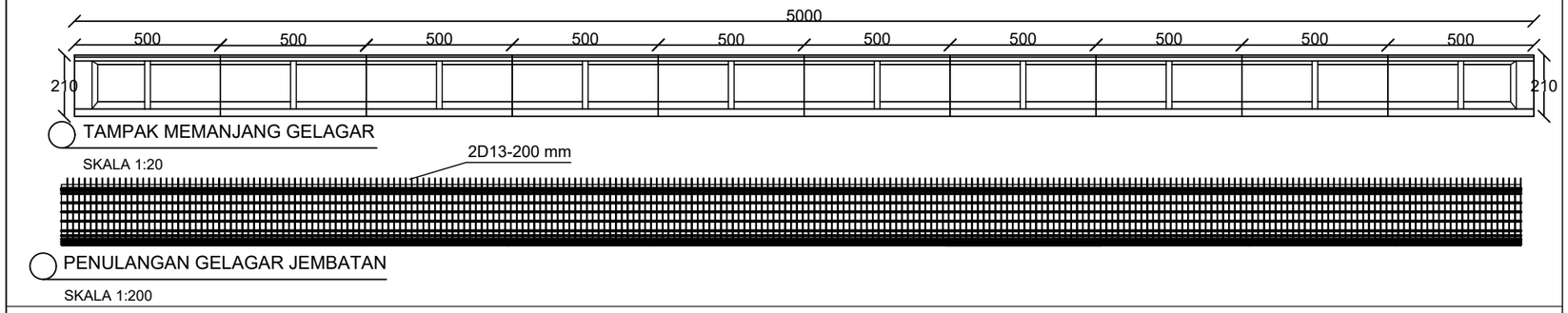
POTONGAN MELINTANG DAN PENULANGAN PELAT JEMBATAN

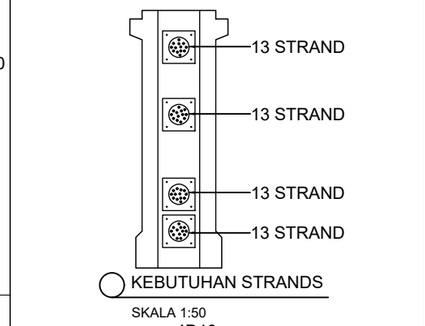
HALAMAN

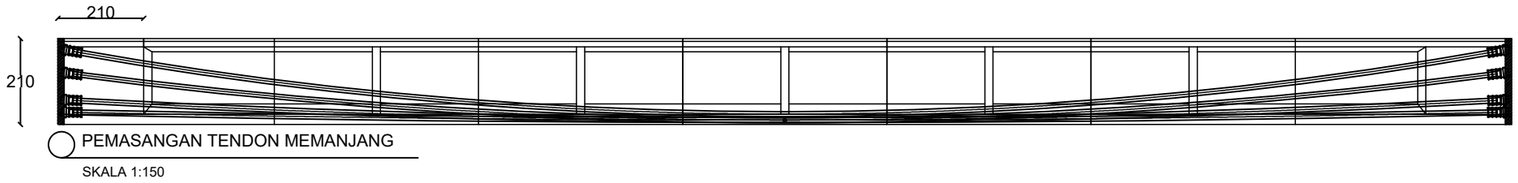
3

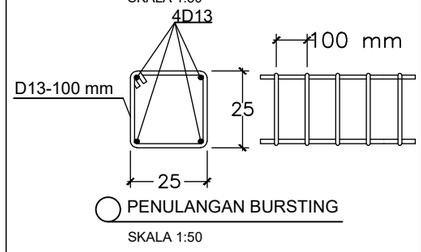
TANGGAL

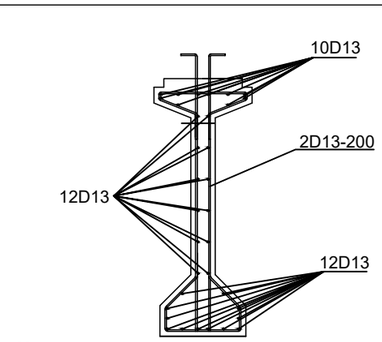
6 NOVEMBER 2025

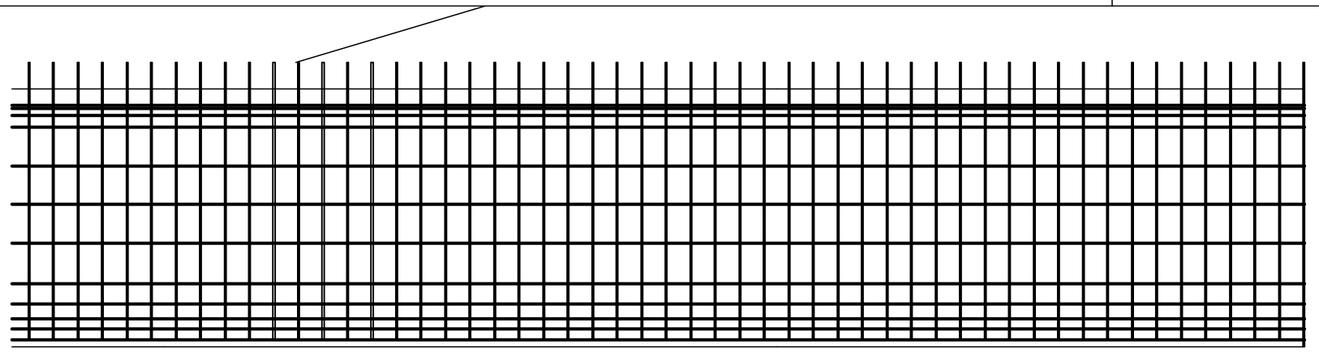


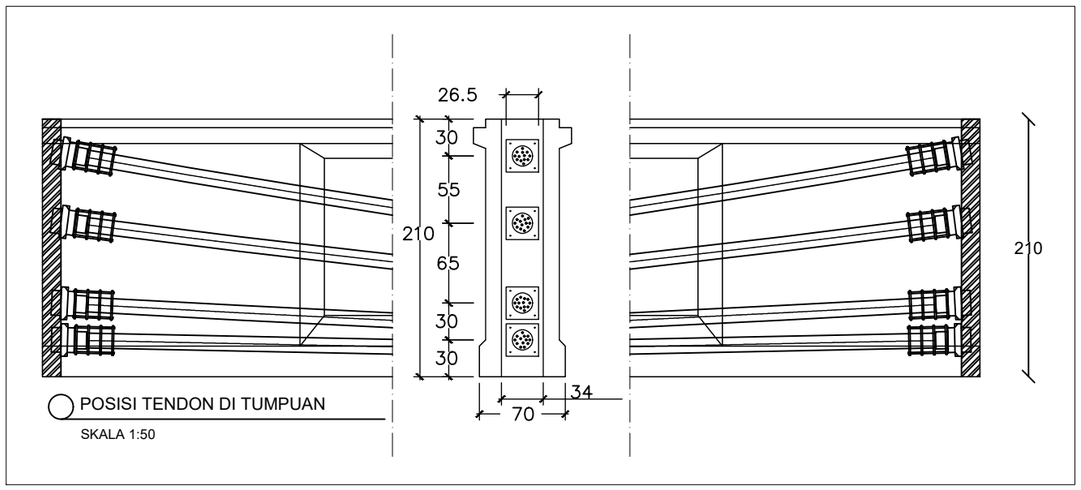


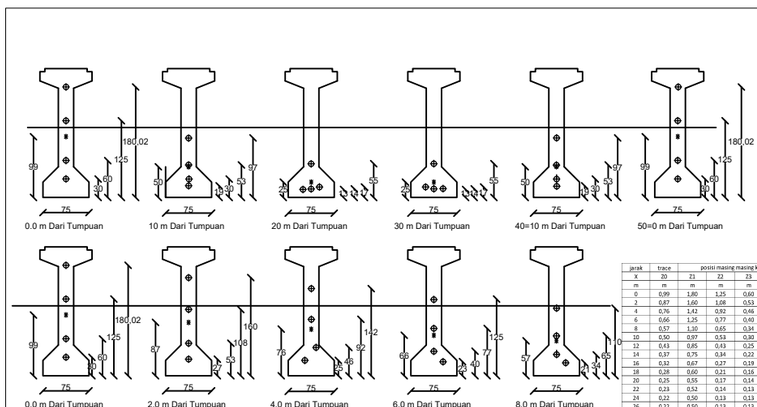












jarak	trace	posisi masing masing kabel			
X	Z0	Z1	Z2	Z3	Z4
m	m	m	m	m	m
0	0,99	1,80	1,25	0,60	0,30
2	0,87	1,60	1,08	0,53	0,27
4	0,76	1,42	0,92	0,46	0,25
6	0,66	1,25	0,77	0,40	0,23
8	0,57	1,10	0,65	0,34	0,21
10	0,50	0,97	0,53	0,30	0,19
12	0,43	0,85	0,43	0,25	0,17
14	0,37	0,75	0,34	0,22	0,16
16	0,32	0,67	0,27	0,19	0,15
18	0,28	0,60	0,21	0,16	0,14
20	0,25	0,55	0,17	0,14	0,13
22	0,23	0,52	0,14	0,13	0,13
24	0,22	0,50	0,13	0,13	0,13
26	0,22	0,50	0,13	0,13	0,13
28	0,23	0,52	0,14	0,13	0,13
30	0,25	0,55	0,17	0,14	0,13
32	0,28	0,60	0,21	0,16	0,14
34	0,32	0,67	0,27	0,19	0,15
36	0,37	0,75	0,34	0,22	0,16
38	0,43	0,85	0,43	0,25	0,17
40	0,50	0,97	0,53	0,30	0,19
42	0,57	1,10	0,65	0,34	0,21
44	0,66	1,25	0,77	0,40	0,23
46	0,76	1,42	0,92	0,46	0,25
48	0,87	1,60	1,08	0,53	0,27
50	0,99	1,80	1,25	0,60	0,30

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

TUGAS AKHIR

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN PERNING KLOJI DI MOJKERTO MENGGUNAKAN *PRESTRESSED CONCRETE I GIRDER*

DOSEN PEMBIMBING

Ir. SUHARYATMA, M.T.

DIBUAT OLEH

RIFDATUN NABILAH
20511243

JUDUL GAMBAR

DESAIN GIRDER JEMBATAN

HALAMAN

3

TANGGAL

6 NOVEMBER 2025