

TUGAS AKHIR

PERBANDINGAN PENGGUNAAN *PCI-GIRDER H-210* DAN *H-170* PADA BENTANG 40 METER JEMBATAN HKS (*COMPARISON OF PCI-GIRDER H-210 AND PCI- GIRDER H-170 ON 40 METER SPREAD OF HKS BRIDGE*)

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



**Adam Muhammad Himawan
18511180**

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

TUGAS AKHIR

**PERBANDINGAN PENGGUNAAN PCI-GIRDER H-210
DAN H-170 PADA BENTANG 40 METER JEMBATAN
HKS
(COMPARISON OF PCI-GIRDER H-210 AND PCI-
GIRDER H-170 ON 40 METER SPREAD OF HKS
BRIDGE)**

Disusun oleh

Adam Muhammad Himawan
18511180

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

Diuji pada tanggal 19 Desember 2022

Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

Penguji I

Penguji II

Suharyatma, Ir., M.T.
NIK: 865110201

Jafar S.T., MURP., M.T.
NIK: 185111305

Anggit Mas Arifudin S.T., M.T.
NIK: 185111304

Mengesahkan,

Ketua Program Studi Teknik Sipil

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, 2 Desember 2022

Yang membuat pernyataan



Adam Muhammad Himawan

(18511180)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirobbil'alamin, puji syukur penulis kehadiran Allah SWT, yang telah memberikan rahmat dan karunia-Nya baik berupa kenikmatan maupun kesehatan lahir dan batin sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “*Perbandingan Penggunaan PCI-Girder H-210 Dan H-170 Pada Bentang 40 m Jembatan HKS*”. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

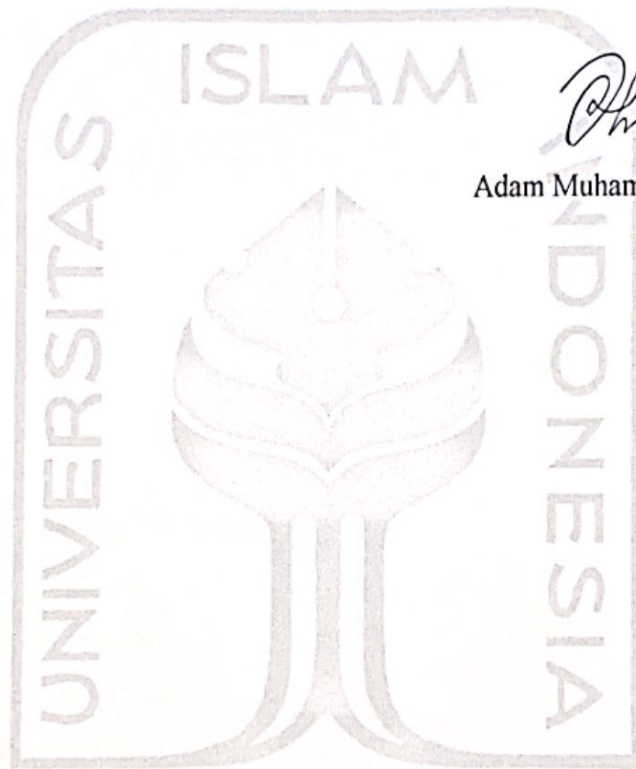
Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak dan Ibu penulis, Hasyim Sanuri dan Dewi Lestari, serta adik penulis, Yasid Muhammad Ismoyo yang selalu memberikan dukungan dan doa.
2. Bapak Suharyatma, Ir., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan banyak masukan dan bimbingan selama mengerjakan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Jafar S.T, MURP., M.T. selaku Dosen Penguji I yang telah memberikan masukan dan saran dalam penelitian tugas akhir ini.
4. Bapak Anggit Mas Arifudin S.T, M.T. selaku Dosen Penguji II yang telah memberikan masukan dan saran dalam penelitian tugas akhir ini.
5. Ibu Yunalia Muntafi, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
6. Bapak Dr.-Ing. Ilya Fadjar Maharika, MA., IAI., selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
7. Teman-teman kontrakan yang selalu memberikan dukungan dan semangatnya.
8. Teman-teman DPA 6 dan Angkatan 2018 yang telah berproses bersama di Teknik Sipil UII.
9. Semua pihak terkait yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

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

Yogyakarta, 2 Desember 2022

Penulis,



Adam Muhammad Himawan

Adam Muhammad Himawan

18511180

DAFTAR ISI

COVER	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
DAFTAR NOTASI	xvi
ABSTRAK	xxi
<i>ABTRACT</i>	xxii
BAB I	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	5
2.1 Tinjauan Umum	5
2.2 Penelitian Terdahulu	5
2.2.1 Perencanaan Balok <i>Girder</i> Profil I pada Jembatan <i>Prestressed</i> dengan Variasi Bentang	5
2.2.2 Desain <i>PCI-Girder</i> untuk Bentang 42 m Berdasarkan Pembebanan SNI 1725:2016 (Studi Kasus: Jalan Soebrantas, Desa Sei. Injab)	6
2.2.3 Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo dengan Menggunakan <i>PCI-Girder</i>	7
2.3 Keabsahan Penelitian	8

BAB III		11
3.1	Tinjauan Umum	11
3.2	Pengertian Jembatan	11
3.3	Material	11
3.4	Prinsip Beton Prategang	12
3.4.1	Sistem Penarikan Baja Prategang	13
3.4.2	Tahap Pembebanan	14
3.5	Batasan Tegangan	15
3.6	Pembebanan	17
3.6.1	Beban Permanen	18
3.6.2	Beban Lalu Lintas	19
3.6.3	Beban Lingkungan	23
3.6.4	Kombinasi Pembebanan	25
3.7	Kehilangan Gaya Prategang	25
3.8	Kapasitas Lentur Penampang	41
3.9	Gaya Geser	43
BAB IV		45
4.1	Tinjauan Umum	45
4.2	Lokasi Penelitian	45
4.3	Data Penelitian	46
4.4	Tahapan Penelitian	49
BAB V		53
5.1	Tinjauan Umum	53
5.2	<i>PCI-Girder</i> H-210cm	53
5.2.1	Perhitungan Modulus Penampang <i>PCI-Girder</i> H-210cm	54
5.2.2	Pembebanan Gelagar	61
5.2.3	Kebutuhan Tendon	86
5.2.4	Kehilangan Prategang	102
5.2.5	Pemeriksaan Tegangan	148
5.2.6	Penulangan Nonprategang Gelagar	159

5.2.7	Kapasitas Lentur Penampang	161
5.2.8	Kapasitas Geser Penampang	168
5.3	Rekapitulasi Perhitungan <i>PCI-Girder</i> H-210 dan <i>PCI-Girder</i> H-170	170
5.4	Pembahasan	178
BAB VI		181
6.1	Kesimpulan	181
6.2	Saran	181
DAFTAR PUSTAKA		182
LAMPIRAN		183



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Sekarang	9
Tabel 3.1	Persyaratan Material	12
Tabel 3.2	Batasan Tegangan Baja Prategang	15
Tabel 3.3	Batasan Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang	16
Tabel 3.4	Batas Tegangan Tekan Saat Layan	16
Tabel 3.5	Batasan Tegangan Tarik Saat Layan	17
Tabel 3.6	Berat Isi Beban Mati	18
Tabel 3.7	Faktor Beban Berat Sendiri	19
Tabel 3.8	Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan	19
Tabel 3.9	Faktor Beban untuk Beban Lajur “D”	20
Tabel 3.10	Faktor Beban untuk Beban “T”	22
Tabel 3.11	Nilai V_o dan Z_o untuk Berbagai Variasi Kondisi Permukaan Hulu	24
Tabel 3.12	Tekanan Angin Dasar	24
Tabel 3.13	Kombinasi Beban dan Faktor Beban	25
Tabel 3.14	Estimasi Nilai Kehilangan Prategang	26
Tabel 4.1	Spesifikasi PCI-Girder H-210cm dan PCI-Girder H-170cm	48
Tabel 5.1	Rekapitulasi Perhitungan Modulus Penampang Gelagar Nonkomposit	56
Tabel 5.2	Rekapitulasi Perhitungan Modulus Penampang Gelagar Komposit	60
Tabel 5.3	Rekapitulasi Perhitungan Berat Sendiri Gelagar	66
Tabel 5.4	Perhitungan Beban Mati Tambahan Gelagar	68
Tabel 5.5	Rekapitulasi Hasil Pembebanan pada PCI-Girder H-210cm	81
Tabel 5.6	Rekapitulasi Perhitungan Gaya Geser dan Momen Maksimum Akibat Pembebanan pada PCI-Girder H-210cm	81
Tabel 5.7	Persamaan Perhitungan Momen dan Gaya Geser pada Jarak Tertentu	82

Tabel 5.8	Momen pada Gelagar Akibat Beban	82
Tabel 5.9	Gaya Geser pada Gelagar Akibat Beban	83
Tabel 5.10	Kombinasi Beban untuk Momen Akibat Beban	84
Tabel 5.11	Kombinasi Beban untuk Gaya Geser Akibat Beban	84
Tabel 5.12	Data Modulus Penampang PCI-Girder H-210cm	87
Tabel 5.13	Data Baja Prategang Berdasarkan VSL	90
Tabel 5.14	Eksentrisitas Masing-masing Tendon	97
Tabel 5.15	Hasil Perhitungan Lintasan Tendon	98
Tabel 5.16	Sudut Angkur	99
Tabel 5.17	Tata Letak Tendon	100
Tabel 5.18	Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan	105
Tabel 5.19	Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur	108
Tabel 5.20	Data Properti Penampang Komposit	112
Tabel 5.21	Rekapitulasi Kehilangan Prategang pada Tengah Bentang	145
Tabel 5.22	Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Transfer	150
Tabel 5.23	Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Konstruksi	153
Tabel 5.24	Tegangan Penampang saat Kondisi Layan	156
Tabel 5.25	Momen yang Bekerja pada Titik Sambungan Gelagar	157
Tabel 5.26	Gaya Prategang Efektif dan Kehilangan Gaya Prategang pada Sambungan	158
Tabel 5.27	Pemeriksaan Tegangan pada Serat Atas Sambungan Gelagar	158
Tabel 5.28	Pemeriksaan Tegangan pada Serat Bawah Sambungan Gelagar	158
Tabel 5.29	Rekapitulasi Penampang Blok tekan	167
Tabel 5.30	Rekapitulasi Perhitungan Modulus Penampang PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H-170	170
Tabel 5.31	Rekapitulasi Perhitungan Gaya Geser PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H-170	171
Tabel 5.32	Rekapitulasi Perhitungan Momen Maksimum PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H-170	171

Tabel 5.33 Data Perhitungan Kebutuhan Tendon PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H-170	174
Tabel 5.34 Rekapitulasi Perhitungan kehilangan prategang pada PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H170	177
Tabel 5.35 Perbandingan Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser	177



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Lokasi Jembatan HKS	2
Gambar 3.1	Sistem Pratraik Beton Prategang	13
Gambar 3.2	Sistem Pascatarik Beton Prategang	14
Gambar 3.3	Ilustrasi Pembebanan Lajur “D”	20
Gambar 3.4	Alternatif Penempatan Beban “D” dalam Arah Memanjang	21
Gambar 3.5	Ilustrasi Pembebanan Beban Truk “T” (500 kN)	22
Gambar 4.1	Lokasi Penelitian (Jembatan HKS)	45
Gambar 4.2	Tampak Samping Desain Jembatan HKS	46
Gambar 4.3	Potongan Melintang 0+325 Jembatan HKS	46
Gambar 4.4	Katalog PCI-Girder PT. Wijaya Karya Beton Tbk.	47
Gambar 4.5	Struktur Atas Jembatan HKS Menggunakan PCI-Girder H-210cm dan PCI-Girder H-170cm	48
Gambar 4.6	Detail Dimensi Penampang PCI-Girder H-210cm dan PCI-Girder H-170cm	49
Gambar 4.7	Tampak Samping PCI-Girder H-210cm dan PCI-Girder H-170cm	49
Gambar 4.8	Flow Chart Penelitian	51
Gambar 5.1	Jembatan HKS Menggunakan PCI-Girder H-210cm	53
Gambar 5.2	Dimensi PCI-Girder H-210cm	53
Gambar 5.3	Tampak Samping PCI-Girder H-210cm	54
Gambar 5.4	Pembagian Penampang PCI-Girder H-210cm	54
Gambar 5.5	Lebar Efektif Pelat Lantai	57
Gambar 5.6	Detail Penampang Gelagar Komposit	59
Gambar 5.7	Beban Gelagar Tengah Bentang	62
Gambar 5.8	Detail Dimensi Diafragma pada PCI-Girder H-210cm	62
Gambar 5.9	Pembebanan Gelagar Akibat Diafragma	63
Gambar 5.10	Penampang Gelagar Tumpuan dan Tengah Bentang	64

Gambar 5.11	Pembebanan Lajur “D”	68
Gambar 5.12	Faktor Beban Dinamis untuk Pembebanan Lajur “D”	69
Gambar 5.13	Pembebanan Akibat Gaya Rem	70
Gambar 5.14	Pembebanan Akibat Beban Angin Kendaraan	74
Gambar 5.15	Pembebanan Akibat Beban Angin Kendaraan	79
Gambar 5.16	Diagram Momen PCI-Girder H-210cm	85
Gambar 5.17	Diagram Gaya geser PCI-Girder H-210cm	86
Gambar 5.18	Lokasi Pusat Prategang dan Eksentrisitas serta Diagram Tegangan pada Tengah Bentang	87
Gambar 5.19	Posisi Tendon di Tengah Bentang	92
Gambar 5.20	Posisi Tendon di Tumpuan	94
Gambar 5.21	Lintasan Tendon	97
Gambar 5.22	Tata Letak Tendon	101
Gambar 5.23	Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan	105
Gambar 5.24	Tegangan Setelah Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pergeseran Angkur dan Gesekan	106
Gambar 5.25	Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan dan Pergeseran Angkur	109
Gambar 5.26	Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Transfer	113
Gambar 5.27	Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Final	117
Gambar 5.28	Penampang Gelagar Komposit Sebelum dan Setelah Transformasi	120
Gambar 5.29	Diagram Tegangan Penampang saat Transfer	150
Gambar 5.30	Diagram Tegangan Penampang saat Konstruksi	153
Gambar 5.31	Diagram Tegangan Penampang Komposit saat Layan	156
Gambar 5.32	Sambungan pada Gelagar	157
Gambar 5.33	Pembagian Gelagar untuk Perhitungan Penulangan Nonprategang	159

Gambar 5.34	Detail Penulangan Nonprategang PCI-Girder H-210	161
Gambar 5.35	Diagram Tegangan Gelagar	162
Gambar 5.36	Potongan Penampang Gelagar	166
Gambar 5.37	Diagram Gaya Geser PCI-Girder H-210	172
Gambar 5.38	Diagram Gaya Geser PCI-Girder H-170	172
Gambar 5.39	Diagram Momen PCI-Girder H-210	173
Gambar 5.40	Diagram Momen PCI-Girder H-170	173
Gambar 5.41	Gelagar Prategang pada Tengah Bentang	175
Gambar 5.42	Gelagar Prategang pada Tumpuan	175
Gambar 5.43	Tata Letak Tendon PCI-Girder H-210	176
Gambar 5.44	Tata Letak Tendon PCI-Girder H-170	176
Gambar 5.45	Perbandingan Diagram Momen PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H-170	178
Gambar 5.46	Perbandingan Diagram Momen PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H-170	179

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Topografi	184
Lampiran 2 Desain Jembatan HKS	185



DAFTAR NOTASI

- α = penjumlahan nilai mutlak perubahan angular jalur baja prategang dari ujung jacking ke titik yang ditinjau
- Δf = perubahan tegangan karena pergeseran ankur
- Δ_{fcd} = rangkai pada pelat
- Δf_{pA} = kehilangan akibat pengangkutan
- Δf_{pES} = jumlah semua kehilangan akibat perpendekan elastisitas
- Δf_{pF} = kehilangan akibat friksi
- Δf_{pi} = kehilangan saat inisial atau awal
- Δf_{pLT} = kehilangan jangka panjang akibat rangkai dan susut pada beton
- Δf_{pT} = total kehilangan prategang
- ΔL = panjang pergeseran ankur
- ε_{bdf} = regangan susut gelagar antara waktu final dan pengecoran pelat
- ε_{bid} = regangan susut gelagar
- ε_{bif} = regangan susut gelagar antara waktu final dan transfer
- ε_{ddf} = regangan susut pelat antara pengecoran pelat dan final
- μ = faktor friksi
- ψ_{tdi} = koefisien rangkai gegar saat waktu transfer dan penempatan pelat karena pembebanan
- ψ_{ftd} = koefisien rangkai gelagar antara pengecoran pelat dan final
- ψ_{ftdd} = koefisien rangkai pelat saat waktu final
- ψ_{fti} = koefisien rangkai gelagar saat waktu final karena pembebanan saat transfer

- A_{cg} = luas penampang gelagar komposit
 A_d = luas penampang
 A_g = luas penampang gelagar
 A_{gti} = luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat transfer
 A_{ps} = luas baja prategang yang digunakan
 A_{surfd} = luas permukaan total pelat
 b_{ef} = lebar sayap efektif
 E = modulus elastisitas angkur
 E_{cig} = modulus elastisitas gelagar saat transfer
 E_{ct} = modulus elastisitas gelagar saat transfer
 E_p = modulus elastisitas baja prategang
 E_{ps} = modulus elastisitas baja prategang
 e = eksentrisitas gelagar
 e_{cg} = eksentrisitas tendon pada penampang komposit
 e_{ct} = eksentrisitas tendon gelagar komposit transformasi di tengah bentang saat final
 e_{tf} = eksentrisitas tendon gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat final
 e_{ti} = eksentrisitas tendon pada penampang gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat transfer
 f'_{cid} = kuat tekan beton saat pertama kali dibebani
 f'_{cig} = kuat tekan beton saat transfer
 f_{cgpi} = tegangan di tendon setelah transfer
 f_{pe} = gaya prategang efektif
 f_{pi} = tegangan baja prategang pada kondisi awal

- f_{pi2} = tegangan saat setelah transfer pada *strand*
 f_{pj} = tegangan pada baja prategang saat penarikan
 f_{pu} = kuat tarik baja prategang
 f_s = tegangan kondisi awal layan
 H_r = kelembaban relatif
 I_{cg} = momen inersia gelagar komposit
 I_{ct} = momen inersia penampang gelagar komposit transformasi saat final
 I_g = inersia penampang gelagar
 I_{tf} = momen inersia penampang gelagar transformasi saat final
 I_{ti} = momen inersia penampang gelagar transformasi saat transfer
 K = koefisien friksi wobble
 K_{ld} = panjang perimeter penampang pelat
 k_{df} = koefisien penampang transformasi antara pengecoran pelat dan final
 k_f = faktor pengaruh kuat tekan beton
 k_{fd} = faktor pengaruh kuat tekan beton
 k_{hc} = faktor kelembaban untuk rangkai
 k_{hs} = faktor kelembaban susut
 k_{hsd} = faktor kelembaban susut
 k_{id} = koefisien penampang transformasi
 k_s = faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau
 k_{sd} = faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau
 k_{tdf} = faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final
 k_{tdi} = faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer
 k_{tdfd} = faktor perpanjangan waktu antara final dan pengecoran pelat

- L = panjang total jembatan yang dibebani
 L_b = panjang jembatan
 L_{pA} = panjang proyeksi horizontal tendon yang dipengaruhi oleh kehilangan prategang akibat pergeseran angkur
 L_{pF} = jarak terhadap titik yang mengalami kehilangan prategang akibat friksi
 MA = momen akibat beban mati tambahan
 M_{LL} = momen akibat beban hidup
 MS = momen akibat berat sendiri
 N = jumlah tendon
 P_e = gaya prategang kondisi akhir
 P_i = gaya prategang saat setelah transfer
 q = intensitas beban terbagi rata (*BTR*) dalam arah memanjang jembatan
 r_{VS} = rasio volume terhadap luas permukaan
 r_{Vsd} = rasio volume terhadap luas permukaan
 S = modulus penampang gelagar
 S_c = modulus penampang komposit
 t_d = umur gelagar saat pengecoran
 t_{dd} = perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final
 t_{di} = perpanjangan waktu antara transfer dan pengecoran pelat
 t_i = umur gelagar saat transfer
 t_s = tebal dek
 t_f = umur gelagar saat final
 t_{fd} = perpanjangan waktu antara pengecoran pelat hingga final
 V_B = kecepatan angin rencana yaitu 90 hingga 126 km/jam pada elevasi 1000 mm
 V_d = volume pelat
 V_{DZ} = kecepatan angin rencana pada elevasi rencana

- V_o = kecepatan gesekan angin
 V_{10} = kecepatan angin pada elevasi 10000 mm di atas permukaan tanah atau di atas permukaan air rencana
 y_b = titik berat penampang terhadap sisi bawah gelagar
 y_{bc} = titik berat penampang komposit terhadap sisi bawah
 y_{bcg} = jarak sumbu netral ke serat terbawah gelagar komposit
 y_{mid} = jarak pusat penampang tendon ke sisi bawah gelagar di tengah bentang
 y_t = titik berat penampang terhadap sisi atas gelagar
 y_{tc} = titik berat penampang komposit terhadap sisi atas
 y_{tcg} = jarak sumbu netral ke serat teratas gelagar komposit
 Z = elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau permukaan air dimana beban angin dihitung
 Z_o = panjang gesekan di hulu jembatan

ABSTRAK

Jembatan adalah struktur yang dibuat untuk menghubungkan dua tempat yang terhalang oleh rintangan. Jembatan HKSJN yang terletak di Banjarmasin merupakan jembatan yang menggunakan beton prategang tipe *PCI-girder*. Jembatan HKSJN terdiri dari 2 bentang yaitu bentang 40 meter yang menggunakan *PCI-girder* H-210cm dan bentang 20 meter yang menggunakan *PCI-girder* H-125cm. Pada *Bridge Product* PT. Wijaya Karya Beton Tbk., untuk bentang 40 meter terdapat 2 pilihan *PCI-girder* yang dapat digunakan, yaitu *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm. Diharapkan dengan kajian ini dapat memudahkan pemilihan penggunaan *PCI-girder* pada bentang 40 meter yang lebih efektif.

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm dengan variabel jumlah *strand*, kehilangan prategang, dan kapasitas lentur serta kapasitas geser pada masing-masing *PCI-girder*.

Dari hasil perhitungan didapatkan bahwa jumlah *strand* yang dibutuhkan oleh *PCI-girder* H-210 lebih hemat 20% dibandingkan *PCI-girder* H-170. Kehilangan prategang akhir yang terjadi pada *PCI-girder* H-210 sebesar 13,351% lebih kecil dibandingkan kehilangan prategang pada *PCI-girder* H-170 sebesar 14,106%. *PCI-girder* H-210 lebih baik dalam menahan beban lentur dan beban geser dibandingkan *PCI-girder* H-170 dengan rasio 1,115 dan 1,467.

Kata kunci : Jembatan, Kehilangan Prategang, *PCI-girder*.

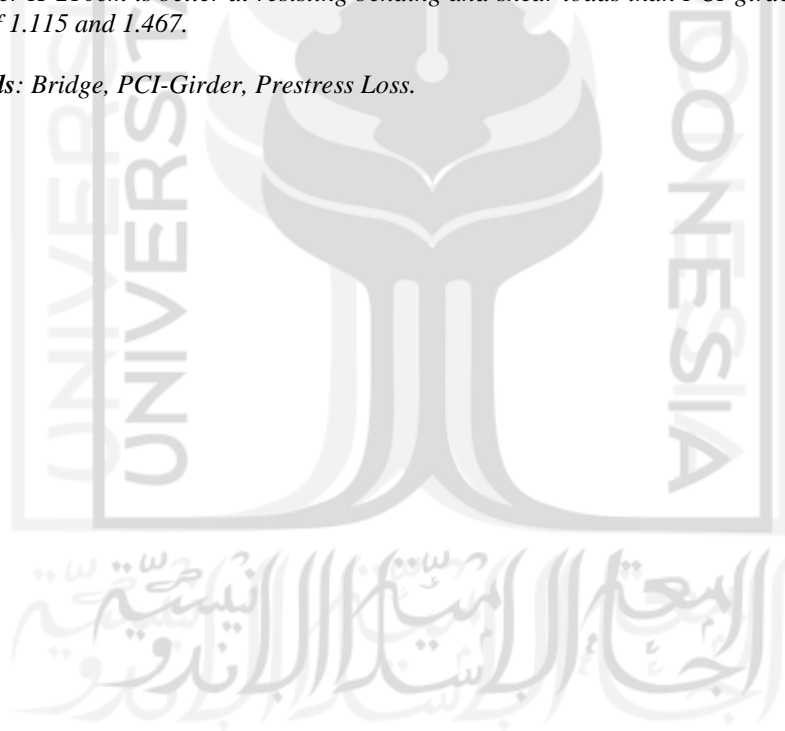
ABTRACT

A bridge is a structure made to connect two places that are blocked by obstacles. The HKS bridge located in Banjarmasin is a bridge that uses PCI-girder. The HKS bridge consists of 2 spans, namely a 40 meter span using PCI-girder H-210cm and a 20 meter span using PCI-girder H-125cm. At Bridge Product PT. Wijaya Karya Beton Tbk., for a span of 40 meters there are 2 PCI-girder options that can be used, namely PCI-girder H-210cm and PCI-girder H-170cm. It is hoped that this study will facilitate the selection of the more effective use of PCI-girder at a span of 40 meters.

This study aims to compare PCI-girder H-210cm and PCI-girder H-170cm with the variable number of strands, prestress loss, and flexural and shear capacities of each PCI-girder.

From the calculation results, it is found that the number of strands needed by PCI-girder H-210cm is 20% more efficient than PCI-girder H-170cm. The final prestress loss that occurred in PCI-girder H-210cm was 13.351% less than the prestress loss in PCI-girder H-170cm of 14.106%. PCI-girder H-210cm is better at resisting bending and shear loads than PCI-girder H-170cm with a ratio of 1.115 and 1.467.

Key words: Bridge, PCI-Girder, Prestress Loss.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Banjarmasin adalah kota yang terletak di Provinsi Kalimantan Selatan. Kota Banjarmasin memiliki banyak anak sungai yang dimanfaatkan oleh masyarakat sebagai sarana transportasi selain jalan darat yang sudah ada. Seiring dengan perkembangan Kota Banjarmasin baik dari segi jumlah penduduk, pertumbuhan ekonomi dan kegiatan sosial budaya, maupun pariwisata maka semakin meningkat juga permasalahan yang harus dihadapi. Sehingga diperlukan pembangunan infrastruktur yang memadai untuk menghubungkan berbagai titik penting dalam Kota Banjarmasin. Salah satu infrastruktur tersebut adalah jembatan. Jembatan merupakan suatu konstruksi yang berfungsi untuk menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh rintangan berupa sungai, lembah, laut, saluran irigasi, jalan kereta api, jalan raya, waduk, dan rintangan lainnya.

Jembatan HKSAN merupakan salah satu jembatan yang ada di Banjarmasin. Jembatan yang mulai dibangun pada tahun 2020 tersebut didirikan untuk mengurangi kemacetan yang terjadi. Jembatan HKSAN berdiri di atas Sungai Barito yang menghubungkan dua kecamatan, yaitu Kecamatan Banjarmasin Barat dan Kecamatan Banjarmasin Utara. Titik lokasi Jembatan HKSAN secara detail dapat dilihat pada Gambar 1.1.

Jembatan HKSAN merupakan jembatan yang menggunakan beton prategang tipe *PCI-girder*. Jembatan HKSAN terdiri dari 2 bentang yaitu bentang 40 meter yang menggunakan *PCI-girder* H-210cm dan bentang 20 meter yang menggunakan *PCI-girder* H-125cm. Pada *Bridge Product* PT. Wijaya Karya Beton Tbk., untuk bentang 40 meter terdapat 2 pilihan *PCI-girder* yang dapat digunakan, yaitu *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm. Hal tersebut menarik perhatian penulis untuk melakukan kajian perbandingan penggunaan *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm untuk struktur atas Jembatan HKSAN. Perbandingan tersebut

ditinjau berdasarkan kebutuhan jumlah *strand*, kehilangan prategang, kapasitas lentur, dan kapasitas geser.



Gambar 1.1 Lokasi Jembatan HKS

1.2 Rumusan Masalah

Pokok permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana perbandingan jumlah *strand* yang digunakan pada *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm?
2. Bagaimana perbandingan kehilangan prategang yang terjadi pada *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm?
3. Bagaimana perbandingan kapasitas lentur dan kapasitas geser penampang *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah untuk mengetahui:

1. Perbandingan jumlah *strand* yang digunakan pada *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm,
2. Perbandingan kehilangan prategang yang terjadi pada *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm, dan

3. Perbandingan kapasitas lentur dan kapasitas geser penampang *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari pengerjaan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Bagi penulis, menambah pemahaman mengenai perhitungan gelagar prategang tipe *PCI-girder*.
2. Bagi pembaca secara umum dan mahasiswa, memberikan wawasan mengenai perhitungan gelagar prategang tipe *PCI-girder* dan sekaligus sebagai referensi untuk penelitian lainnya terkait gelagar prategang.
3. Bagi perencana, memberikan informasi mengenai pertimbangan pemilihan tipe *PCI-girder* yang akan digunakan berdasarkan dimensi yang tersedia.

1.5 Batasan Penelitian

Batasan penelitian dibuat untuk memberikan gambaran tentang poin-poin yang akan dan yang tidak akan dilakukan pada penelitian. Berikut adalah batasan pada penelitian ini.

1. Penelitian menggunakan bentang 40 meter pada Jembatan HKSN sebagai studi kasus.
2. Gelagar yang digunakan adalah gelagar prategang tipe *PCI-girder* yang disusun secara lurus.
3. *PCI-girder* yang digunakan adalah tipe gelagar segmental.
4. Spesifikasi *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm sesuai dengan katalog *Bridge Product* PT. Wijaya Karya Beton Tbk.
5. Spesifikasi *barrier*, trotoar, dan tebal pelat sesuai dengan desain Jembatan HKSN.
6. Perhitungan dilakukan berdasarkan SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan dan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No. 02/M/BM/2021.
7. Perhitungan yang dilakukan mencakup perhitungan jumlah *strand* dan tendon yang digunakan, perhitungan kehilangan prategang seketika dan kehilangan

prategang jangka panjang, serta perhitungan kapasitas lentur dan kapasitas geser penampang.

8. Perhitungan dilakukan menggunakan Microsoft Excel 2016 dan penggambaran dilakukan menggunakan Autodesk AutoCAD 2019.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Tinjauan pustaka adalah ringkasan mengenai pandangan, pendapat, dan hasil dari penelitian-penelitian terdahulu mengenai topik yang sejenis dengan penelitian yang sekarang. Tinjauan pustaka dapat digunakan sebagai acuan untuk menentukan teknik analisis yang akan digunakan untuk data yang sudah dikumpulkan serta memberi dasar pemikiran agar dapat menyimpulkan hasil penelitian sesuai dengan tujuan penelitian tersebut. Dengan adanya tinjauan mengenai penelitian terdahulu maka akan meningkatkan kualitas penelitian yang sekarang. Sehingga tinjauan pustaka dapat dikatakan sebagai salah satu indikator kualitas penelitian yang sekarang.

Dalam bab ini akan ditinjau penelitian-penelitian terdahulu yang sejenis dengan penelitian yang sekarang yaitu mengenai desain jembatan. Selain itu bab ini juga berisi mengenai perbedaan penelitian terdahulu dengan penelitian yang sekarang.

2.2 Penelitian Terdahulu

2.2.1 Perencanaan Balok *Girder* Profil I pada Jembatan *Prestressed* dengan Variasi Bentang

Penggunaan gelagar profil I merupakan tipe profil yang paling banyak digunakan karena memiliki penampang yang kecil sehingga merupakan penampang yang paling ekonomis dan juga merupakan penampang yang mudah dalam proses pembuatan, lebih efisien, dan mudah pelaksanaannya di lapangan. Oleh karena itu, Armin, H. Manalip, dan Banu Dwi Handono melakukan penelitian mengenai dimensi penampang gelagar prategang profil I yang optimal sesuai dengan perubahan panjang gelagar untuk masing-masing bentang jembatan. Penelitian

yang dilakukan oleh mahasiswa Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Sam Ratulangi Manado tersebut mengacu pada RSNI T-02-2005 mengenai “Standar Pembebanan untuk Jembatan”. Dari penelitian yang dilakukan pada tahun 2018 tersebut dihasilkan bahwa dimensi gelagar untuk lebar jembatan 9 m dan bentang 20 m adalah $b = 0,47$ m dan $h = 0,95$ dengan gaya prategang awal sebesar 3745 kN, tendon yang digunakan adalah 2 tendon dengan total *strand* sebanyak 30 buah. Untuk jembatan dengan lebar 9 m dan bentang 30 m dimensi yang optimal adalah $b = 0,6$ m dan $h = 1,36$ m dengan gaya prategang awal sebesar 6026 kN yang membutuhkan 3 tendon dengan total *strand* sebanyak 48 *strand*. Jika penggunaan tendon dioptimalkan maka gelagar pada bentang 30 m hanya menggunakan 2 tendon saja dengan jumlah total *strand* sebanyak 46 buah dan gaya prategang awal sebesar 6150 kN. Sedangkan pada jembatan dengan lebar 9 m dan bentang 40 m dibutuhkan dimensi $b = 0,8$ m dan $h = 1,74$ m dengan gaya prategang awal sebesar 9415 kN serta jumlah tendon yang dibutuhkan sebanyak 4 buah dengan 72 *strand*. Jika penggunaan tendon dioptimalkan dengan hanya menggunakan 2 tendon saja maka dibutuhkan *strand* sebanyak 70 buah dengan gaya prategang awal sebesar 9500 kN.

2.2.2 Desain PCI-Girder untuk Bentang 42 m Berdasarkan Pembebanan SNI 1725:2016 (Studi Kasus: Jalan Soebrantas, Desa Sei. Injab)

Penelitian ini dilakukan oleh Zev Al Jauhari dan Mutiara Pertiwi dari Program Studi D-IV Teknik Pereancangan Jalan dan Jembatan, Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Bengkalis. Penelitian yang dilakukan pada tahun 2021 tersebut dilatar belakangi oleh adanya eksisting Jembatan Sungai Pengalir yang telah dibangun pada tahun 2013 menggunakan standar pembebanan jembatan yang lama yaitu RSNI T-02-2005. Sedangkan peneliti mencoba untuk mendesain jembatan tersebut dengan peraturan pembebanan yang baru yaitu SNI 1725:2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan. Penelitian tersebut dilakukan pada jembatan dengan panjang 42 m yang dibagi menjadi 2 bentang masing-masing sepanjang 21 m dengan lebar jembatan 7,5 m. *PCI-girder* yang digunakan adalah *PCI-girder* H-170cm yang diproduksi oleh PT. Wika Beton. Dari penelitian tersebut didapatkan jumlah *strand* yang dibutuhkan pada tiap gelagar adalah sebanyak 12 *strand* dengan

diameter 12,7 yang dibagi menjadi 4 tendon. Selain itu dibutuhkan gelagar sebanyak 4 buah dengan jarak masing-masing gelagar adalah 2 meter dengan momen ultimit (M_u) dan geser ultimit (V_u) secara berturut-turut sebesar 1086,71 kNm dan 1618,81 kN. Pada gelagar prategang tersebut terjadi kehilangan prategang pada asumsi awal desain sebesar 25,23%.

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

Rusaknya jembatan di Desa Hargorojo, Kecamatan Bagelen, Kabupaten Purworejo menarik peneliti yaitu Agung Nusantoro, Eksi Widyananto, Nurmansyah Alami, dan Pratiwi Dian Islami Prbuningrat untuk melakukan perencanaan ulang struktur atas jembatan dengan bentang 16 m dan lebar 7 m tersebut. Perencanaan tersebut dilakukan menggunakan beton prategang paska-tarik jenis *PCI-girder*. Dengan mengacu pada SNI 1725:2016, penelitian yang dilakukan pada tahun 2022 tersebut menghasilkan bahwa gelagar yang dibutuhkan adalah *PCI-girder* dengan tinggi 0,9 m dengan 2 tendon yang masing-masing memiliki 7 *strand* dan 12 *strand* dengan diameter 12,7 mm spesifikasi VSL. Gaya prategang awal sebesar 2080,651 kN dengan gaya prategang efektif sebesar 1759,921 kN dan kehilangan gaya prategang yang terjadi sebesar 28,10%. Tegangan izin tarik dan tegangan izin tekan diperoleh secara berturut-turut sebesar 1,44 MPa dan -19,92 MPa. Sementara tegangan tarik dan tegangan tekan yang terjadi pada keadaan awal pada serat atas adalah sebesar 0,447 MPa dan -13,847 MPa yang semuanya tidak melebihi tegangan izinnya sehingga tidak mengalami keretakan. Nilai tegangan beton saat keadaan akhir pada serat atas pelat adalah -0,107 MPa, serat atas balok -1,623 MPa, dan serat bawah balok sebesar -8,447 MPa yang mengalami tegangan tekan tidak melebihi tegangan izin tekan sebesar -18,68 MPa sehingga tidak mengalami retak. Momen ultimit yang terjadi akibat kombinasi pembebanan (M_u) sebesar 2140,38 kNm aman terhadap momen ultimit gelagar prategang (ϕM_n) sebesar 2268,381 kNm. Lendutan yang terjadi pada gelagar sebesar 0,0191 meter lebih kecil dari lendutan izin sebesar 0,0533 meter sehingga jembatan aman terhadap lendutan.

2.3 Keabsahan Penelitian

Dengan penelitian terdahulu yang telah diuraikan di atas, maka perhitungan gelagar prategang pada penelitian kali ini akan mengacu pada SNI 1725:2016 mengenai pembebanan jembatan. Sebagai bukti keabsahan penelitian, perbedaan penelitian terdahulu dan penelitian yang sekarang dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.



Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Parameter	Penelitian			
1	Peneliti	Armin, H. Manalip, dan Banu Dwi Handono	Zev Al Jauhari dan Mutiara Pertiwi	Agung Nusantoro, Eksi Widyananto, Nurmansyah Alami, dan Pratiwi Dian Islami Prbuningrat	Adam Muhammad Himawan
2	Judul	Perencanaan Balok Girder Profil I pada Jembatan Prestressed dengan Variasi Bentang	Desain PCI-Girder untuk Bentang 42 m Berdasarkan Pembebanan SNI 1725:2016 (Studi Kasus: Jalan Soebrantas, Desa Sei. Injab)	Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo dengan Menggunakan PCI-Girder	Perbandingan Penggunaan <i>PCI-Girder</i> H-210 DAN H-170 pada Bentang 40 Meter Jembatan HKSN
3	Tahun Penelitian	2018	2021	2022	2022
4	Rumusan Masalah	Mengetahui dimensi penampang gelagar prategang profil I yang optimal sesuai dengan perubahan panjang gelagar untuk masing-masing bentang jembatan	Mendesain ulang Jembatan Sungai Pengalir yang awalnya mengacu RSNI T-02-2005 menjadi SNI 1725:2016	Melakukan perencanaan ulang pada jembatan dengan bentang 16 m dan lebar 7 m	Membandingkan <i>PCI-girder</i> H-210cm dan <i>PCI-girder</i> H-170cm dengan parameter jumlah <i>strand</i> , kehilangan prategang, kapasitas lentur, dan kapasitas geser

Lanjutan Tabel 2.1 Perbedaan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

No	Parameter	Penelitian			
			Jembatan Sungai Pengalir	Jembatan di Desa Hargorojo	Jembatan HKSJN
5	Objek Penelitian	-	Jembatan Sungai Pengalir	Jembatan di Desa Hargorojo	Jembatan HKSJN
6	Peraturan yang Digunakan	RSNI T-02-2005	SNI 1725:2016	SNI 1725:2016	SNI 1725:2016
7	Hasil dan Pembahasan	Semakin panjang bentang jembatan, maka dimensi, jumlah strand, dan gaya prategang yang dibutuhkan semakin banyak	Bentang 42 m dibagi menjadi 2 masing-masing sepanjang 21 m. Pada bentang 21 m digunakan PCI-Girder H-170cm dari PT Wika Beton dengan jumlah strand 12 buah dengan 4 tendon. Serta dibutuhkan gelagar sebanyak 4 buah dengan jarak 2 m	Dibutuhkan PCI-Girder dengan tinggi 0,9 m dengan jumlah tendon sebanyak 2 buah yang masing-masing berisi 7 strand dan 12 strand, serta kehilangan prategang yang terjadi adalah 28,1 %	Jumlah <i>strand</i> yang dibutuhkan oleh <i>PCI-girder</i> H-210 lebih hemat 20% dibandingkan <i>PCI-girder</i> H-170. Kehilangan prategang akhir yang terjadi pada <i>PCI-girder</i> H-210 sebesar 13,351% lebih kecil dibandingkan kehilangan prategang pada <i>PCI-girder</i> H-170 sebesar 14,106%. <i>PCI-girder</i> H-210 lebih baik dalam menahan beban lentur dan beban geser dibandingkan <i>PCI-girder</i> H-170 dengan rasio 1,115 dan 1,467

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tinjauan Umum

Bab ini menjelaskan mengenai teori yang digunakan sebagai landasan penulisan tugas akhir mengenai perbandingan penggunaan *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm pada Jembatan HKSJN. Teori yang digunakan adalah teori yang mendukung topik tersebut mulai dari bagaimana perhitungan kebutuhan *strand* hingga perhitungan kapasitas lentur dan kapasitas geser penampang.

3.2 Pengertian Jembatan

Jembatan adalah struktur yang dibuat untuk menghubungkan dua tempat yang terhalang oleh rintangan. Pada Jembatan HKSJN, struktur yang dibuat akan menghubungkan dua tempat yaitu Kecamatan Banjarmasin Barat dan Kecamatan Banjarmasin Utara yang dihalangi oleh rintangan berupa Sungai Barito.

Jembatan memiliki 2 komponen penyusun yaitu struktur atas (*upper structure*) dan struktur bawah (*sub structure*). Struktur atas adalah komponen penyusun jembatan yang berfungsi untuk memindahkan beban yang diterima lantai jembatan ke perletakkan arah horizontal. Pada struktur atas Jembatan HKSJN terdiri dari *barrier*, trotoar, lantai jembatan, gelagar (*girder*), dan diafragma. Sedangkan struktur bawah adalah bagian dari jembatan yang berdiri di atas tanah dasar yang berfungsi untuk memikul beban struktur atas yang kemudian diteruskan ke tanah dasar. Pada Jembatan HKSJN, struktur bawah jembatannya terdiri dari abutmen, pilar, dan fondasi.

3.3 Material

Persyaratan material yang digunakan berdasarkan RSNI T-12-2004 adalah seperti pada Tabel 3.1 berikut.

Tabel 3.1 Persyaratan Material

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

3.4 Prinsip Beton Prategang

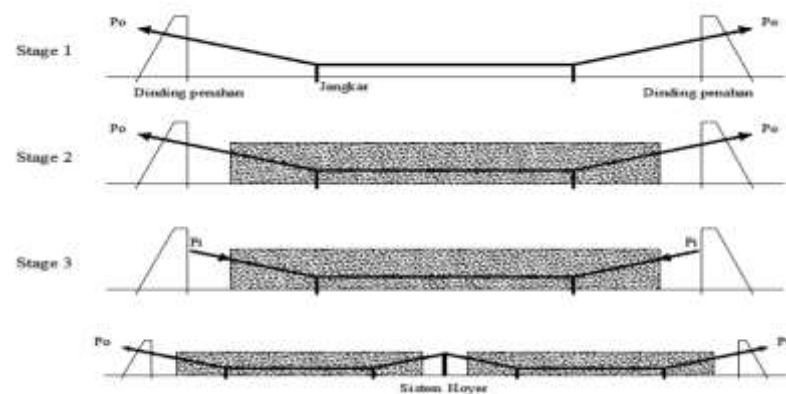
Pada perencanaan desain Jembatan HKSN struktur utama yang digunakan adalah beton prategang. Menurut Hadipratomo (2006), beton prategang merupakan struktur komposit yang terdiri dari beton dan baja dengan mutu tinggi. Fungsi baja adalah untuk menahan tarikan dan beton berfungsi untuk menahan desakan sehingga kedua bahan tersebut akan membentuk tahanan untuk menahan momen eksternal. Kombinasi ini memungkinkan pemakaian yang aman dan ekonomis dari kedua bahan tersebut.

Pada penelitian kali ini penampang beton prategang yang digunakan adalah tipe *I-Girder*. Sesuai namanya, penampang ini berbentuk seperti huruf I dengan penampang bagian tengah lebih langsing dari bagian pinggirnya. Penampang *I-Girder* memiliki banyak keunggulan yaitu, merupakan penampang yang paling ekonomis, hal ini dikarenakan jika dibandingkan dengan tipe yang lain penampang *I-Girder* merupakan penampang yang paling kecil. Selain itu penampang *I-Girder* juga dianggap mudah dalam proses pembuatan, lebih efisien, mudah dalam pelaksanaan di lapangan, serta efektif menahan beban tekuk dan geser.

3.4.1 Sistem Penarikan Baja Prategang

1. Pratarik (*Pretensioning*)

Pada sistem pratarik, baja prategang ditarik/diregangkan terlebih dahulu dan dijangkarkan pada tembok/dinding penahan (*bulkhead*), kemudian beton dicor. Setelah beton mencapai umur/kekuatan tertentu, baja prategang menekan komponen/balok. Transfer gaya prategang umumnya melalui ikatan/lekatan antara baja prategang dengan beton yang mengelilinginya. Pemakaian praktis dari metode pratarik ini pertama kali dikerjakan oleh E.Hoyer, sehingga dikenal sebagai system Hoyer (Aboe, A.K., 2006). Untuk lebih jelasnya lihat Gambar 3.1.

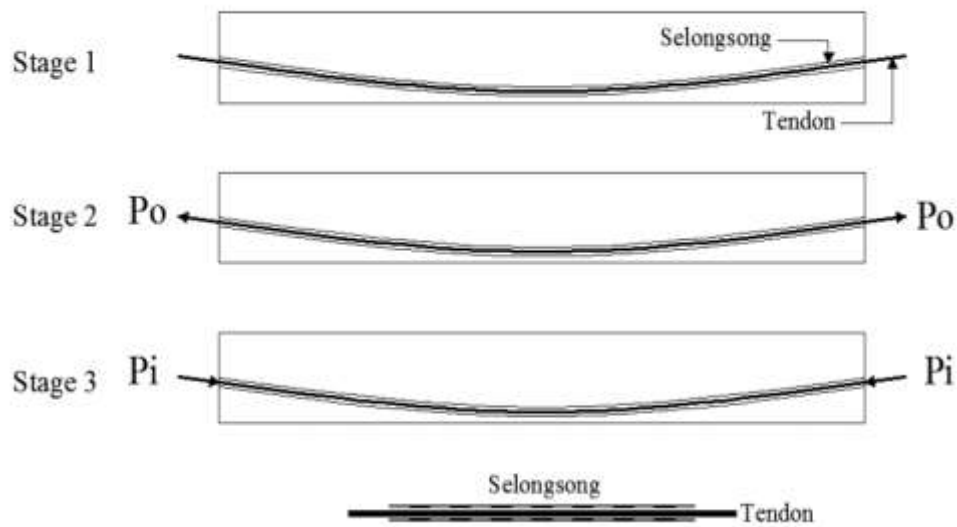


Gambar 3.1 Sistem Pratraik Beton Prategang

(Sumber: Aboe, A.K.,2006)

2. Pascatarik (*Posttensioning*)

Sistem pascatarik merupakan kebalikan sistem pratarik. Pada cara ini pertamanya beton dicor/dicetak terlebih dahulu, dengan baja prategang sesuai alinyemen yang direncanakan terletak di dalam selongsong (*duck*) juga ikut tercor. Setelah beton mencapai umur/kekuatan tertentu, baja prategang ditarik dan kemudian dijangkarkan/diangkurkan pada ujung komponen. Transfer gaya prategang pada sistem ini melalui angkur (Aboe, A.K., 2006). Untuk lebih jelasnya lihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Sistem Pascatarik Beton Prategang

(Sumber: Aboe, A.K.,2006)

3.4.2 Tahap Pembebanan

Dalam perancangan beton prategang, pembebanan tidak hanya ditinjau berdasarkan beban eksternal yang bekerja, seperti beban mati dan beban hidup, tetapi juga terhadap kombinasi dari beban-beban tersebut dengan gaya prategang yang bekerja pada penampang beton. Diantara tahap pembebanan tersebut yang paling kritis biasanya pada tahap sesaat setelah baja ditegangkan (*initial stage*) dan pada masa pelayanan/akhir (*service/final stage*). (Bambang S. dan Agus S.M, 2007)

1. *Initial Stage*

Initial stage adalah tahap dimana gaya prategang dipindahkan pada beton dan tidak ada beban luar yang bekerja selain berat sendiri. Pada tahap ini gaya prategang maksimum sebab belum ada kehilangan prategang dan kekuatan beton minimum sebab umur beton masih muda, konsekuensinya tegangan pada beton menjadi kritis. Pada sistem penarikan awal (*pretensioning*), untuk mempercepat proses penarikan, tendon dilepaskan pada saat beton mencapai (60-80)% kekuatan yang disyaratkan yaitu pada umur 28 hari. Pada sistem penarikan akhir (*posttensioning*), tendon tidak ditarik sekaligus tetapi ditarik dalam dua atau tiga tahap untuk memberikan kesempatan kepada beton untuk mencapai kekuatan yang disyaratkan gaya prategang diterapkan sepenuhnya. (Naaman, 1982).

2. Final Stage

Tahap ini merupakan kondisi paling berat untuk kondisi masa pelayanan, dengan asumsi bahwa semua kehilangan prategang telah terjadi sehingga gaya prategang telah mencapai nilai terkecil dan kombinasi beban luar mencapai nilai terbesar yaitu meliputi berat sendiri, beban mati, beban hidup, beban kejut dan sejenisnya. (Naaman, 1982).

3.5 Batasan Tegangan

Untuk mencegah terjadinya *overstress*, tegangan yang terjadi pada tendon pada keadaan batas layan (*service limit state*), keadaan batas kekuatan (*strength limit state*) dan keadaan batas ekstrem (*extreme event limit state*) perlu dibatasi. Batasan tegangan tersebut diatur pada AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.2.

1. Baja Prategang

Batasan tegangan pada baja prategang diatur seperti pada Tabel 3.2 berikut.

Tabel 3.2 Batasan Tegangan Baja Prategang

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

(Sumber: AASHTO LRFD 2017)

2. Beton Sebelum Kehilangan Prategang

Batas tegangan tekan untuk sistem pratarik dan pascatarik sebelum terjadi kehilangan prategang adalah $0,6\sqrt{f'_c}$. Batasan ini diatur dalam AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.3.1b. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut.

Tabel 3.3 Batasan Tegangan Beton Sebelum Kehilangan Prategang

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

(Sumber: AASHTO LRFD 2017)

3. Tegangan Tekan Saat Layan

Tegangan tekan pada gelagar diperiksa pada kombinasi beban keadaan batas layan I. Batas tegangan ini digunakan pada gelagar dengan mutu beton hingga 103 MPa. Batasan tegangan ini diatur dalam AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.3.2a. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Batas Tegangan Tekan Saat Layan

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

(Sumber: AASHTO LRFD 2017)

4. Tegangan Tarik Saat Layan

Untuk kombinasi beban layan yang meliputi beban lalu lintas, tegangan tarik pada komponen prategang diperiksa dengan menggunakan kombinasi beban layan III. Batasan tegangan tarik pada gelagar diatur dalam AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.2.3.2b. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Batasan Tegangan Tarik Saat Layan

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

(Sumber: AASHTO LRFD 2017)

3.6 Pembebanan

Perencanaan pembebanan untuk jembatan di Indonesia dihitung berlandaskan pada Peraturan Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725:2016. Pada penelitian ini, perhitungan yang dilakukan adalah perhitungan jembatan pada bagian gelagar. Berikut adalah beban yang bekerja pada gelagar berdasarkan SNI 1725:2016.

3.6.1 Beban Permanen

Perhitungan beban permanen adalah perhitungan massa bagian-bagian bangunan jembatan berdasarkan dimensi dan berat jenis bahan penyusunnya. Cara perhitungannya adalah mengalikan massa dengan percepatan gravitasi (g), dimana nilai percepatan gravitasi yang digunakan adalah $9,81 \text{ m/detik}^2$ sesuai dengan standar yang digunakan. Adapun besarnya kerapatan massa dan berat isi untuk bahan penyusun dapat dilihat pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Berat Isi Beban Mati

No.	Bahan	Berat Isi (kN/m^3)	Kerapatan Massa (kg/m^3)
1	Lapisan permukaan beraspal	22,0	2245
2	Besi tuang	71,0	7240
3	Timbunan tanah dipadatkan	17,2	1755
4	Kerikil dipadatkan	18,8-22,7	1920-2315
5	Beton aspal	22,0	2245
6	Beton ringan	12,25-19,6	1250-2000
7	Beton ($f'_c < 35 \text{ MPa}$)	22,0-25,0	2320
	Beton ($35 \text{ MPa} < f'_c < 105 \text{ MPa}$)	$22+0,022 f'_c$	$2240+2,29 f'_c$
8	Baja	78,5	7850
9	Kayu	7,8	800
10	Kayu keras	11,0	1125

Sumber: SNI 1725:2016

Perhitungan beban permanen meliputi perhitungan beban-beban sebagai berikut:

1. Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri jembatan adalah penjumlahan antara elemen struktural dan elemen nonstruktural yang dianggap tetap. Berikut adalah faktor beban untuk berat sendiri yang bisa dilihat pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Faktor Beban Berat Sendiri

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

Sumber: SNI 1725:2016

2. Beban Mati Tambahan/Utilitas (MA)

Beban mati jembatan adalah kumpulan berat setiap bagian struktural dan nonstruktural jembatan. Sedangkan beban mati tambahan adalah elemen nonstruktural jembatan yang terdiri dari seluruh bahan penyusun yang membentuk beban pada jembatan. Besar beban mati tambahan pada jembatan dapat berubah-ubah selama umur jembatan. Dalam perencanaannya, jembatan harus bisa memikul beban tambahan berupa aspal beton dengan ketebalan 50 mm untuk pelapisan kembali di kemudian hari. Selain itu, sarana lain di jembatan juga harus diperhitungkan sehingga keadaan yang paling membahayakan dapat diperhitungkan. Berikut adalah faktor beban untuk beban mati tambahan yang dapat dilihat pada Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Faktor Beban untuk Beban Mati Tambahan

Tipe Beban	Faktor beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan (γ_{MA}^S)		Keadaan Batas Ultimit (γ_{MA}^U)	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Umum	1,00 ⁽¹⁾	2,00	0,70
	Khusus (terawasi)	1,00	1,40	0,80

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

Sumber: SNI 1725:2016

3.6.2 Beban Lalu Lintas

Beban lalu lintas pada perencanaan jembatan terdiri dari beban lajur “D” dan beban truk “T”. Beban lajur “D” adalah beban yang bekerja pada seluruh lebar jalur

kendaraan yang dapat menimbulkan pengaruh pada jembatan. Sedangkan beban truk “T” adalah satu kendaraan berat dengan 3 gandar yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Beban “D” menjadi penentu untuk perhitungan jembatan dengan bentang sedang sampai panjang, sedangkan beban “T” menentukan perhitungan untuk jembatan bentang pendek dan lantai kendaraan.

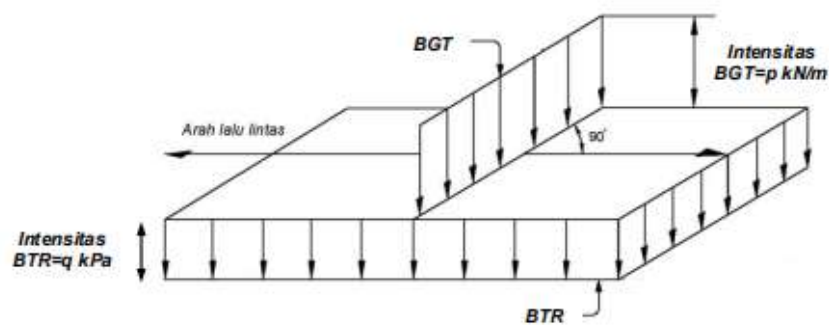
1. Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” terdiri dari dua beban yaitu, beban terbagi rata (BTR) dan beban garis terpusat (BGT) dengan faktor beban sesuai dengan Tabel 3.9.

Tabel 3.9 Faktor Beban untuk Beban Lajur “D”

Tipe Beban	Jembatan	Faktor beban (γ_{TD})	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TD}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TD}^U)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

Sumber: SNI 1725:2016



Gambar 3.3 Ilustrasi Pembebanan Lajur “D”

Sumber: SNI 1725:2016

Intensitas untuk beban terbagi rata (BTR) adalah q kPa dengan nilai q bergantung pada panjang total yang dibebani L .

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

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

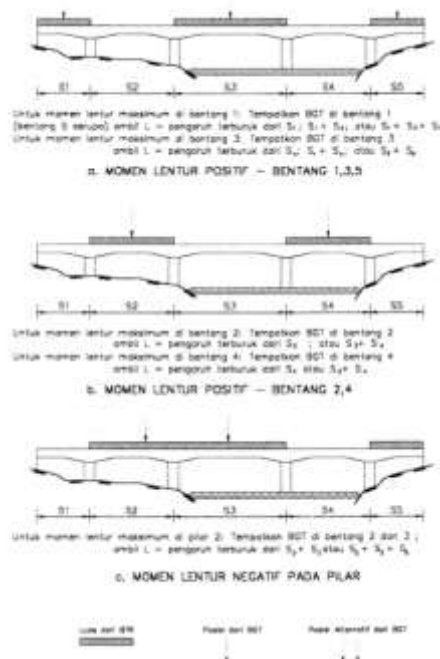
Keterangan:

q = intensitas beban terbagi rata (*BTR*) dalam arah memanjang jembatan (kPa)

L = panjang total jembatan yang dibebani (meter)

Sedangkan intensitas beban garis terpusat (*BGT*) adalah p kN/m dengan nilai p adalah 49,0 kN/m. Penempatan *BGT* harus tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan.

Dalam distribusi beban “D” untuk mendapatkan momen maksimum maka beban “D” harus disusun pada arah melintang. Susunan komponen *BTR* dan *BGT* dari beban “D” dapat dilihat pada Gambar 3.3, sedangkan untuk penempatan dalam arah memanjang dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Alternatif Penempatan Beban “D” dalam Arah Memanjang

Sumber: SNI 1725:2016

2. Beban Truk "T" (TT)

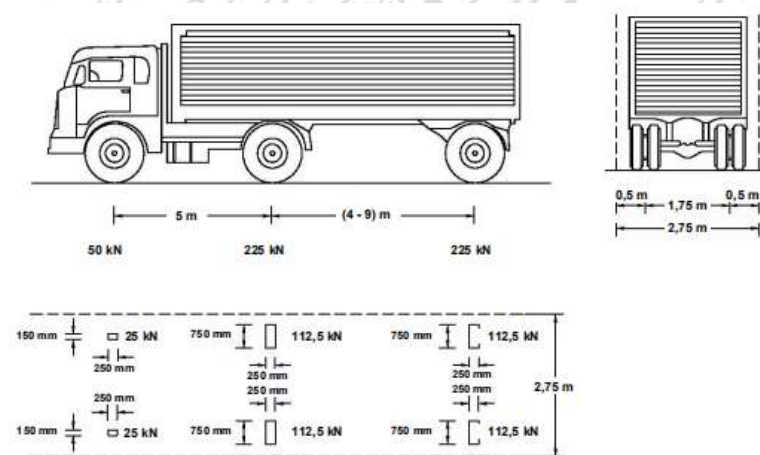
Beban truk "T" digunakan untuk menghitung struktur lantai dimana beban truk "T" tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban "D". Faktor beban "T" yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Faktor Beban untuk Beban "T"

Tipe Beban	Jembatan	Faktor Beban γ_{TT}	
		Keadaan Batas Layan (γ_{TT}^S)	Keadaan Batas Ultimit (γ_{TT}^U)
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

Sumber: SNI 1725:2016

Untuk pembebanan truk "T" terdiri dari truk *semi-trailer* dengan berat tiap gandar disebarakan menjadi 2 beban merata yang sama besar membentuk bidang kotak antara roda dengan permukaan lantai dimana jarak antar gandar tersebut dapat diubah dari 4,0 m hingga 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan. Ilustrasi pembebanan truk "T" dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Ilustrasi Pembebanan Beban Truk "T" (500 kN)

Sumber: SNI 1725:2016

3. Gaya Rem (*TB*)

Gaya rem diasumsikan bekerja secara horizontal pada jarak 1,8 m di atas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan. Nilai gaya rem diambil dari nilai yang terbesar antara 25% berat truk desain atau 5% berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata *BTR*.

4. Pembebanan untuk Pejalan Kaki (*TP*)

Untuk trotoar dengan lebar lebih dari 600 mm harus dapat menerima beban pejalan kaki dengan intensitas 5 kPa dan dianggap bekerja bersamaan dengan beban kendaraan pada setiap lajur.

3.6.3 Beban Lingkungan

1. Beban Angin

a. Tekanan Angin Horizontal

Tekanan angin diasumsikan memiliki kecepatan dasar (V_B) sebesar 90 hingga 126 km/jam. Perhitungan kecepatan angin rencana (V_{DZ}) untuk bagian jembatan dengan elevasi lebih dari 10000 mm di atas permukaan tanah atau permukaan air dilakukan dengan rumus sebagai berikut:

$$V_{DZ} = 2,5 \cdot V_o \cdot \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \cdot \ln \left(\frac{Z}{Z_o} \right) \quad (3.3)$$

Keterangan:

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

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

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

Z = elevasi struktur diukur dari permukaan tanah atau permukaan air

dimana beban angin dihitung ($Z > 10000$ mm)

V_o = kecepatan gesekan angin (km/jam)

Z_o = panjang gesekan di hulu jembatan (mm)

V_{10} dapat dihitung dari:

- Grafik kecepatan angin dasar untuk berbagai periode ulang
- Survei angin pada lokasi jembatan
- Jika tidak ada data yang lebih baik, diasumsikan $V_{10} = V_B = 90$ s/d 126 km/jam

Tabel 3.11 Nilai V_o dan Z_o untuk Berbagai Variasi Kondisi Permukaan Hulu

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

Sumber: SNI 1725:2016

1) Beban Angin pada Struktur (EW_s)

Jika tidak ada data yang mendukung, maka tekanan angin rencana dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

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

Keterangan:

P_B adalah tekanan angin dasar seperti ditentukan dalam Tabel 3.12 (MPa)

Tabel 3.12 Tekanan Angin Dasar

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

Sumber: SNI 1725:2016

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

2) Gaya Angin pada Kendaraan (EW_f)

Jembatan harus direncanakan memikul gaya akibat tekanan angin pada kendaraan. Tekanan tersebut diasumsikan sebagai tekanan menerus sebesar 1,46 N/mm, tegak lurus, dan bekerja 1800 mm di atas permukaan jalan.

3.6.4 Kombinasi Pembebanan

Faktor beban kombinasi pembebanan yang digunakan mengikuti Tabel 3.13 berikut.

Tabel 3.13 Kombinasi Beban dan Faktor Beban

Kondisi Beban	MS MA TA PR PL SH	TT TD TB TR TP	EU	EW ₁	EW ₂	BF	EU ₁	TG	ES	Gunakan salah satu		
										EQ	TC	TV
Kuat I	γ_p	1,8	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat II	γ_p	1,4	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat III	γ_p	-	1,00	1,40	-	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Kuat IV	γ_p	-	1,00	-	-	1,00	0,50/1,20	-	-	-	-	-
Kuat V	γ_p	-	1,00	0,40	1,00	1,00	0,50/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Ekstrem I	γ_p	γ_{TD}	1,00	-	-	1,00	-	-	-	1,0	-	-
Ekstrem II	γ_p	0,50	1,00	-	-	1,00	-	-	-	-	1,0	1,0
Daya Javan I	1,00	1,00	1,00	0,30	1,00	1,00	1,00/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Javan II	1,00	1,30	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	-	-	-	-	-
Daya Javan III	1,00	0,80	1,00	-	-	1,00	1,00/1,20	γ_{TD}	γ_{ES}	-	-	-
Daya Javan IV	1,00	-	1,00	0,70	-	1,00	1,00/1,20	-	1,00	-	-	-
Fatig (TD dan TR)	-	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Catatan: γ_p dapat berupa γ_{TD} , γ_{TR} , γ_{ES} , γ_{EQ} , γ_{TC} , γ_{TV} , γ_{EU} , γ_{EW_1} , γ_{EW_2} tergantung beban yang ditinjau
 γ_{TD} adalah faktor beban hidup kondisi gempa

Sumber: SNI 1725:2016

3.7 Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang adalah berkurangnya gaya yang berkerja pada tendon gelagar prategang dalam setiap tahap pembebanan. Kehilangan tersebut terjadi akibat sistem penegangan maupun akibat pengaruh waktu. Kehilangan prategang dibagi menjadi 2, yaitu kehilangan prategang seketika yang disebabkan

oleh perpendekan elastis dari beton, gesekan disepanjang kelengkungan tendon pada struktur pascatarik, dan slip pada angkur serta kehilangan prategang akibat pengaruh waktu yang disebabkan oleh perpendekan dari beton pada level baja akibat rangkai dan penyusutan beton dan baja. Berikut adalah estimasi kehilangan prategang awal yang dapat dilihat pada Tabel 3.14.

Tabel 3.14 Estimasi Nilai Kehilangan Prategang

Nilai Tipikal Kehilangan Prategang			
Kasus	I	II	III
Pelat	23% - 24%	21% - 23%	19% - 21%
Gelagar	32% - 35%	28% - 32%	25% - 28%

Sumber: Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No. 02/M/BM/2021

Keterangan:

Kasus I : Komponen cor di tempat dengan tendon pratarik pada kondisi atmosfer kering

Kasus II : Komponen cor di tempat dengan tendon pratarik pada kondisi atmosfer basah

Kasus III : Komponen pracetak dengan tendon pascatarik

Perhitungan kehilangan gaya prategang dapat dilakukan dengan langkah berikut sebagai berikut.

1. Menentukan Kehilangan Gaya Prategang yang Terjadi

Pada jembatan segmental, kehilangan prategang terdiri dari 3 fase sebagai berikut.

a. Kehilangan Prategang saat Transfer

Kehilangan prategang saat transfer terjadi ketika beton prategang selesai dilakukan penarikan kemudian dilakukan pengangkuran. Pada kondisi tersebut, baja prategang akan berusaha kembali ke bentuk awal sebelum penarikan. Karena baja prategang sudah menyatu dengan beton akibat *grouting* maka hal tersebut akan menekan beton. Oleh sebab itu dinamakan transfer karena adanya transfer tegangan dari baja prategang ke beton. Pada

kondisi ini gaya prategang yang bekerja maksimum sedangkan beban yang bekerja minimum. Pada saat transfer terjadi 3 kriteria kehilangan prategang sebagai berikut.

1) Kehilangan Prategang Akibat Gesekan (Δf_{pF})

Pada *PCI-girder* selubung tendon berbentuk parabolik. Hal ini mengakibatkan saat dilakukan penarikan akan terjadi gesekan sehingga gaya tarik yang bekerja di penampang lebih kecil dari gaya tarik awal. Kehilangan prategang akibat gesekan dapat dihitung dengan persamaan berikut sesuai dengan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.2.2.b.

$$\Delta f_{pF} = f_{pj} \cdot \left(1 - e^{-(K \cdot x - \mu \cdot \alpha)}\right) \quad (3.5)$$

Keterangan:

- f_{pj} = tegangan pada baja prategang saat penarikan (MPa)
- x = panjang tendon dari ujung *jacking* ke titik yang ditinjau (mm)
- K = koefisien friksi wobble
- μ = faktor friksi
- α = penjumlahan nilai mutlak perubahan angular jalur baja prategang dari ujung *jacking* ke titik yang ditinjau (rad)
- e = logaritma natural dasar

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

Ketika baja prategang sudah ditarik kemudian akan dilakukan penguncian. Pada saat penguncian tersebut bisa terjadi pergeseran angkur yang mengakibatkan kehilangan prategang. Kehilangan prategang akibat pergeseran dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$\Delta f_{pA} = \Delta f_f \cdot \left(1 - \frac{x}{L_{pA}}\right) \quad (3.6)$$

$$L_{pA} = \sqrt{\frac{E \cdot \Delta L \cdot L_{pF}}{\Delta f_{pF}}} \quad (3.7)$$

$$\Delta f = \frac{2 \cdot \Delta f_{pF} \cdot L_{pA}}{L_{pF}} \quad (3.8)$$

Keterangan:

L_{pA} = panjang proyeksi horizontal tendon yang dipengaruhi oleh kehilangan prategang akibat pergeseran ankur (mm)

x = jarak horizontal dari ujung *jacking* ke titik yang ditinjau (mm)

Δf = perubahan tegangan karena pergeseran ankur (MPa)

L_{pF} = jarak terhadap titik yang mengalami kehilangan prategang akibat friksi

ΔL = panjang pergeseran ankur (berkisar antara 0,125 in (3,175 mm) hingga 0,375 in (9,525 mm))

E = modulus elastisitas ankur (MPa)

3) Kehilangan Prategang Akibat Perpendekan Elastis (Δf_{pES})

Setelah dilakukan pengangkuran dan gaya prategang mulai bekerja pada beton sehingga beton mengalami penekanan dan terjadi perpendekan pada beton. Perpendekan pada beton juga mengakibatkan *strand* dalam beton ikut memendek. Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis dapat dilakukan dengan persamaan berikut sesuai dengan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.5.2.3b.

$$\Delta f_{pES} = \frac{N-1}{2 \cdot N} \cdot \frac{E_p}{E_{ct}} \cdot f_{cgp} \quad (3.9)$$

Keterangan:

N = jumlah tendon

f_{cgp} = jumlah tegangan pada beton pada titik berat tendon karena gaya prategang setelah penarikan dan berat sendiri gelagar pada daerah momen maksimum (MPa)

E_p = modulus elastisitas baja prategang (MPa)

E_{ct} = modulus elastisitas gelagar saat transfer (MPa)

b. Kehilangan Prategang saat Transfer hingga Pengecoran Dek

Kehilangan prategang ini terjadi pada masa konstruksi pengecoran dek, *barrier*, hingga diafragma. Pada kondisi ini pembebanan hanya terjadi pada gelagar saja karena gelagar dan pelat belum menjadi struktur komposit. Berikut adalah kehilangan prategang yang terjadi saat transfer hingga pengecoran dek.

1) Kehilangan Prategang Akibat Susut pada Gelagar (Δf_{pSR})

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

$$\Delta f_{pSR} = \varepsilon_{bid} \cdot E_{ps} \cdot k_{id} \quad (3.10)$$

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot \frac{A_{ps}}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{A_g \cdot e_{mid}^2}{I_g}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{tfii})} \quad (3.11)$$

$$\varepsilon_{bid} = k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{iddi} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \quad (3.12)$$

$$k_s = 1,45 - 0,0051 \cdot r_{VS} \quad (3.13)$$

$$k_{hs} = 2 - 0,014 \cdot H_r \quad (3.14)$$

$$k_f = \frac{35}{7 + f'_{cig}} \quad (3.15)$$

$$k_{iddi} = \frac{t_{di}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{di}} \quad (3.16)$$

Keterangan:

ε_{bid} = regangan susut gelagar

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

k_{id} = koefisien penampang transformasi

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

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

k_s = faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau

k_{hs} = faktor kelembaban untuk susut

k_f = faktor pengaruh kuat tekan beton

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

r_{VS} = rasio volume terhadap luas permukaan

H_r = kelembaban relatif

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

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

2) Kehilangan Prategang Akibat Relaksasi Tendon (Δf_{pR1})

Relaksasi *strand* adalah kehilangan prategang yang bergantung terhadap waktu dimana kehilangan akibat relaksasi terjadi jika *strand* mengalami regangan konstan dalam jangka waktu yang cukup lama. Kehilangan

tendon akibat relaksasi tendon rentang waktu transfer hingga pengecoran pelat (Δf_{pR1}) berdasarkan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.2c diizinkan sebesar 1,2 ksi atau 8 MPa untuk *low relaxation strand*.

3) Kehilangan Prategang Akibat Rangkak pada Gelagar (Δf_{pCR})

Kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar dapat dihitung sesuai dengan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.2b.

$$\Delta f_{pCR} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgpi} \cdot \psi_{tdti} \cdot k_{id} \quad (3.17)$$

$$\psi_{tdti} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{iddi} \cdot t_i^{-0,118} \quad (3.18)$$

$$f_{cgpi} = \left| \frac{-P_i}{A_{gii}} - \frac{P_i \cdot e_{ti}}{I_{ii}} + \frac{M_{MS-G} \cdot e_{ti}}{I_{ii}} \right| \quad (3.19)$$

$$P_i = f_{pi2} \cdot A_{ps} \quad (3.20)$$

$$f_{pi2} = f_{pbt} - (\Delta f_{pES} + \Delta f_{pF} + \Delta f_{pR1}) \quad (3.21)$$

Keterangan:

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

ψ_{tdti} = koefisien rangkak gegar saat waktu transfer dan penempatan pelat karena pembebanan

k_{id} = koefisien penampang transformasi

k_{hc} = faktor kelembaban untuk rangkak

k_f = faktor pengaruh kuat tekan beton

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

- t_i = umur gelagar saat transfer (hari)
 P_i = gaya prategang saat setelah transfer (kN)
 e_{ti} = eksentrisitas tendon pada penampang gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat transfer (mm)
 A_{gti} = luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat transfer
 I_{ti} = momen inersia penampang gelagar transformasi saat transfer
 f_{pi2} = tegangan saat setelah transfer pada *strand* (MPa)
 f_{pbt} = tegangan baja prategang sebelum transfer (MPa)

c. Kehilangan Prategang Saat Pengecoran Dek Hingga Waktu Akhir

Kehilangan prategang ini terjadi saat gelagar dan pelat telah menjadi struktur komposit hingga batas akhir umur jembatan. Pada kondisi ini beban bekerja maksimum sedangkan gaya prategang yang bekerja minimum. Berikut adalah kehilangan prategang yang terjadi saat pengecoran dek hingga waktu akhir.

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

Perhitungan kehilangan prategang akibat susut pada gelagar saat pengecoran dek hingga waktu akhir dihitung berdasarkan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.3a.

$$\Delta_{fpSD} = \varepsilon_{bdf} \cdot E_{ps} \cdot k_{df} \quad (3.22)$$

$$k_{df} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot \frac{A_{ps}}{A_{cg}} \cdot \left(1 + \frac{A_{cg} \cdot e_{cg}^2}{I_{cg}}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{tfi})} \quad (3.23)$$

$$e_{cg} = y_{bcg} - y_{mid} \quad (3.24)$$

$$\varepsilon_{bdf} = \varepsilon_{bif} - \varepsilon_{bid} \quad (3.25)$$

$$\varepsilon_{bif} = k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{idfd} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \quad (3.26)$$

$$k_{idfd} = \frac{t_{fd}}{61 - 0,58 f'_{cig} + t_{fd}} \quad (3.27)$$

$$t_{fd} = t_f - t_d \quad (3.28)$$

Keterangan:

ε_{bdf} = regangan susut gelagar antara waktu final dan pengecoran pelat

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

k_{df} = koefisien penampang transformasi antara pengecoran pelat dan final

E_{cig} = modulus elastis gelagar saat transfer (MPa)

A_{cg} = luas penampang gelagar komposit (mm²)

A_{ps} = luas baja prategang yang digunakan (mm²)

e_{cg} = eksentrisitas tendon pada penampang komposit (mm)

I_{cg} = momen inersia gelagar komposit (mm⁴)

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

y_{bcg} = jarak sumbu netral ke serat terbawah gelagar komposit (mm)

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

ε_{bif} = regangan susut gelagar antara waktu final dan transfer

ε_{bid} = regangan susut gelagar antara waktu transfer dan pengecoran pelat

k_s = faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau

k_{hs} = faktor kelembaban susut

k_f = faktor pengaruh kuat tekan beton

k_{idfd} = faktor perpanjangan waktu antara final dan pengecoran pelat

t_{fd} = perpanjangan waktu antara pengecoran pelat hingga final (hari)

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

t_f = umur gelagar saat final (hari)

t_d = umur gelagar saat pengecoran (hari)

2) Kehilangan Prategang Akibat Rangkak pada Gelagar (Δ_{fpCD})

Perhitungan kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar saat pengecoran dek hingga waktu akhir dihitung berdasarkan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.3b.

$$\Delta_{fpCD} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cspi} \cdot (\psi_{tfi} - \psi_{tdi}) \cdot k_{df} + \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \cdot \Delta_{fcd} \cdot \psi_{tfd} \cdot k_{df} \quad (3.29)$$

$$\Delta_{fcd} = -\left(\Delta_{fpSR} + \Delta_{fpCR} + \Delta_{fpR1}\right) \cdot \frac{A_{ps}}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{A_g \cdot e_{mid}^2}{I_g}\right) - \left(\frac{M_S \cdot e_{tf}}{I_{tf}} + \frac{M_A \cdot e_{ct}}{I_{ct}}\right)$$

$$\psi_{tfd} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{idfd} \cdot t_d^{-0,118} \quad (3.30)$$

Keterangan:

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

ψ_{tdi} = koefisien rangkak gelagar saat waktu transfer dan penempatan pelat karena pembebanan saat transfer

k_{df} = koefisien penampang transformasi antara pengecoran pelat dan final

ψ_{ffd} = koefisien rangkai gelagar antara pengecoran pelat dan final

e_{ct} = eksentrisitas tendon gelagar komposit transformasi di tengah bentang saat final (mm)

e_{tf} = eksentrisitas tendon gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat final (mm)

I_{ct} = momen inersia penampang gelagar komposit transformasi saat final (mm⁴)

I_{tf} = momen inersia penampang gelagar transformasi saat final (mm⁴)

k_{hc} = faktor kelembaban untuk rangkai

3) Kehilangan Prategang Akibat Relaksasi Tendon (Δ_{fpR2})

Perhitungan kehilangan prategang akibat relaksasi tendon saat pengecoran dek hingga waktu akhir dihitung berdasarkan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.3c.

$$\Delta_{fpR2} = \Delta_{fpR1} \quad (3.31)$$

4) Tambahan Prategang Akibat Susut pada Dek (Δ_{fpSS})

Susut yang terjadi pada dek beton di atas pusat penampang komposit secara umum akan memberikan prategang tambahan pada baja prategang yang terletak di bawah pusat penampang komposit karena penyusutan dek beton lebih besar daripada penyusutan gelagar pracetak. Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung tambahan prategang sesuai dengan AASHTO LRFD 2017 pasal 5.9.3.4.3d.

$$\Delta_{fpSS} = \left| \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \cdot \Delta_{fcfd} \cdot k_{df} \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{iftdd}) \right| \quad (3.32)$$

$$\Delta_{fcfd} = \frac{\varepsilon_{ddf} \cdot A_d \cdot E_{cd}}{1 + 0,7 \cdot \psi_{iftdd}} \cdot \left(\frac{1}{A_{cg}} - \frac{e_{cg} \cdot e_d}{I_{cg}} \right) \quad (3.33)$$

$$e_d = y_{icg} + \frac{t_s}{2} \quad (3.34)$$

$$\psi_{iftdd} = 1,9 \cdot k_{sd} \cdot k_{hc} \cdot k_{fd} \cdot k_{iddf} \cdot t_i^{-0,118} \quad (3.35)$$

$$\varepsilon_{ddf} = k_{sd} \cdot k_{hsd} \cdot k_{fd} \cdot k_{iddf} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \quad (3.36)$$

$$k_{iddf} = \frac{t_{dd}}{61 - 0,58 \cdot f_{cid}' + t_{dd}} \quad (3.37)$$

$$t_{dd} = t_f - t_d \quad (3.38)$$

$$k_{fd} = \frac{35}{7 + f_{cid}'} \quad (3.39)$$

$$k_{hsd} = 2 - 0,014 \cdot H_r \quad (3.40)$$

$$k_{sd} = 1,45 - 0,0051 \cdot r_{vSd} \quad (3.41)$$

$$r_{vSd} = \frac{V_d}{A_{surfd}} \quad (3.42)$$

$$V_d = A_{surfd} \cdot L_b \quad (3.43)$$

$$A_{surfd} = K_{lld} \cdot L_b + 2 \cdot A_d \quad (3.44)$$

$$K_{lld} = 2 \cdot b_{ef} + 2 \cdot t_s \quad (3.45)$$

$$A_d = t_s \cdot b_{ef} \quad (3.46)$$

Keterangan:

Δ_{fcfd} = rangkai pada pelat (MPa)

ψ_{fidd} = koefisien rangkai pelat saat waktu final

ε_{ddf} = regangan susut pelat antara pengecoran pelat dan final

A_d = luas penampang (mm^2)

E_{cd} = modulus elastisitas beton pada pelat saat umur 28 hari (MPa)

e_{cg} = modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari (MPa)

e_d = eksentrisitas pelat terhadap titik berat penampang komposit (mm)

I_{cg} = momen inersia gelagar komposit (mm^4)

A_{cg} = luas penampang gelagar komposit (mm^2)

y_{icg} = jarak sumbu netral ke serat teratas gelagar komposit (mm)

t_s = tebal dek (mm)

k_{sd} = faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau

k_{hc} = faktor kelembaban untuk rangkai

k_{fd} = faktor pengaruh kuat tekan beton

k_{iddf} = faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final

t_i = umur gelagar saat transfer (hari)

k_{hsd} = faktor kelembaban susut

- t_{dd} = perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final (hari)
 f'_{cid} = kuat tekan beton saat pertama kali dibebani (MPa)
 t_f = umur gelagar saat final (hari)
 t_d = umur gelagar saat pengecoran (hari)
 H_r = kelembaban relatif
 r_{vsd} = rasio volume terhadap luas permukaan
 V_d = volume pelat (mm³)
 A_{surfd} = luas permukaan total pelat (mm²)
 L_b = panjang jembatan (mm)
 K_{lld} = panjang perimeter penampang pelat (mm)
 b_{ef} = lebar sayap efektif (mm)

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

$$\Delta f_{pi} = \Delta f_{pF} + \Delta f_{pA} + \Delta f_{pES} \quad (3.47)$$

$$\Delta f_{pT} = \Delta f_{pi} + \Delta f_{pLT} \quad (3.48)$$

Gaya prategang pada kondisi awal dapat dilakukan dengan persamaan berikut.

$$f_{pi} = 0,75 \cdot f_{pu} - \Delta f_{pi}$$

$$P_i = A_{ps} \cdot f_{pi} \quad (3.49)$$

Tegangan pada kondisi akhir dihitung dengan persamaan berikut.

$$f_{pe} = 0,75 \cdot f_{pu} - \Delta f_{pT}$$

$$P_e = A_{ps} \cdot f_{pe} \quad (3.50)$$

Keterangan:

Δf_{pi} = kehilangan saat inisial atau awal (MPa)

Δf_{pLT} = kehilangan jangka panjang akibat rangkai dan susut pada beton (MPa)

Δf_{pT} = total kehilangan prategang (MPa)

Δf_{pF} = kehilangan akibat friksi (MPa)

Δf_{pA} = kehilangan akibat pengankuran (MPa)

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

f_{pi} = tegangan baja prategang pada kondisi awal (MPa)

f_{pu} = kuat tarik baja prategang (MPa)

P_i = gaya prategang kondisi awal

A_{ps} = luas tendon prategang (mm²)

P_e = gaya prategang kondisi akhir (kN)

f_{pe} = gaya prategang efektif (MPa)

2. Menentukan Tegangan yang Terjadi pada Penampang

a. Kondisi *Stressing*

$$f_i = \pm \frac{P_i}{A_g} + \frac{P_i \cdot e}{S} \pm \frac{MS}{S}$$

$$S = \frac{I_g}{y_i} \text{ atau } S = \frac{I_g}{y_b} \quad (3.51)$$

Keterangan:

f_i = tegangan pada saat *stressing* (MPa)

P_i = gaya prategang pada kondisi awal (kN)

A_g = luas penampang gelagar (mm^2)

MS = momen akibat berat sendiri gelagar (kNm)

S = modulus penampang gelagar (mm^3)

I_g = inersia penampang gelagar (mm^4)

e = eksentrisitas gelagar (mm)

y_t = titik berat penampang terhadap sisi atas gelagar (mm)

y_b = titik berat penampang terhadap sisi bawah gelagar (mm)

b. Kondisi saat Pelaksanaan

$$f_{cons} = \pm \frac{P_i}{A_g} \pm \frac{P_i \cdot e}{S} \pm \frac{MS}{S} \quad (3.52)$$

Keterangan:

f_{cons} = tegangan pada saat pelaksanaan (MPa)

MS = momen akibat berat sendiri gelagar, berat pelat lantai, berat dek, berat diafragma, dan *RC plate* (kNm)

c. Kondisi Layan

$$f_s = \pm \frac{P_e}{A_g} \pm \frac{P_e \cdot e}{S} \pm \frac{MS}{S} \pm \frac{MA + M_{LL}}{S_c} \quad (3.53)$$

$$S_c = \frac{I_c}{y_{tc}} \text{ atau } S_c = \frac{I_c}{y_{bc}}$$

Keterangan:

f_s = tegangan kondisi awal layan (MPa)

I_c = inersia penampang komposit (mm^4)

S_c = modulus penampang komposit (mm^3)

- MA = momen akibat beban mati tambahan (kNm)
 M_{LL} = momen akibat beban hidup (kNm)
 MS = momen akibat berat sendiri gelagar, berat pelat lantai, berat dek, berat diafragma, dan *RC plate* (kNm)
 P_e = gaya prategang kondisi akhir (kN)
 y_{bc} = titik berat penampang komposit terhadap sisi bawah (mm⁴)
 y_{tc} = titik berat penampang komposit terhadap sisi atas (mm⁴)

3.8 Kapasitas Lentur Penampang

Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk perhitungan kapasitas lentur penampang berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021.

1. Faktor Blok Tegangan Beton (β_1)

Nilai β_1 ditentukan berdasarkan mutu beton (f'_c) yang digunakan. Berikut adalah ketentuan yang digunakan.

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

Dengan syarat $\beta_1 \geq 0,65$

2. Tinggi efektif penampang (d_p)

$$d_p = h - e \quad (3.54)$$

3. Koefisien friksi wobble (k)

$$k = 2 \cdot \left(1,04 - \frac{f_{py}}{f_{pu}} \right) \quad (3.55)$$

4. Letak Sumbu Netral (c)

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

$$c = \frac{A_{ps} \cdot f_{pu} + A_s \cdot f_s - A_s' \cdot f_s'}{0,85 \cdot f'_{cg} \cdot \beta_1 \cdot b + k \cdot A_{ps} \cdot \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (3.56)$$

Namun jika dalam perhitungan tidak menggunakan baja tulangan untuk tulangan tarik dan tekan, maka persamaan di atas tereduksi menjadi sebagai berikut.

$$c = \frac{A_{ps} \cdot f_{pu}}{0,85 \cdot f'_{cg} \cdot \beta_1 \cdot b + k \cdot A_{ps} \cdot \frac{f_{pu}}{d_p}} \quad (3.57)$$

5. Tegangan Rata-rata Tendon Prategang (f_{ps})

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - k \cdot \frac{c}{d_p} \right) \quad (3.58)$$

6. Tinggi blok tekan ekivalen (a)

$$a = c \cdot \beta_1 \quad (3.59)$$

7. Kapasitas Lentur Penampang pada Tengah Bentang (M_n)

Nilai tegangan yang terjadi pada penampang harus lebih kecil dari tegangan yang diizinkan. Untuk menentukan kapasitas lentur penampang digunakan persamaan berikut.

$$M_n = A_{ps} \cdot f_{ps} \cdot \left(d_p - \frac{a}{2} \right) \quad (3.60)$$

Keterangan:

d_p = tinggi efektif penampang (mm)

a = tinggi tegangan blok tekan ekivalen (mm)

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

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

- k = koefisien friksi wobble
 f_{py} = tegangan leleh baja prategang (MPa)
 f_{pu} = tegangan putus baja prategang (MPa)
 f'_{cg} = kuat tekan beton (MPa)
 β_1 = faktor blok tegangan beton
 b = lebar sayap tekan (mm)
 c = letak sumbu netral (mm)

3.9 Gaya Geser

Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung kuat geser pada beton prategang berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021.

1. Kontribusi Gaya Prategang terhadap Ketahanan Geser (V_p)

$$V_p = P_{ef} \cdot \frac{(y_{end} - y_{mid})}{r_{tendon}} \quad (3.61)$$

2. Regangan Longitudinal di Baja Tulangan (ε_s)

$$\varepsilon_s = \frac{\left(\frac{|M_u|}{d_v} + 0,5 \cdot N_u + |V_u - V_p| - A_{ps} \cdot 0,7 \cdot f_{pu} \right)}{E_{ps} \cdot A_{ps}} \quad (3.62)$$

3. Faktor Indikasi Kemampuan Retak Diagonal Beton (β)

- a. Penampang dengan Tulangan Minimum

$$\beta = \frac{4,8}{(1 + 750 \cdot \varepsilon_s)} \quad (3.63)$$

- b. Penampang tanpa Tulangan Minimum

$$\beta = \frac{4,8}{(1 + 750 \cdot \varepsilon_s)} \cdot \frac{51}{(39 + s_{xe})} \quad (3.64)$$

4. Kuat Geser Beton (V_c)

Untuk menghitung gaya geser maksimum yang dapat ditahan oleh beton penampang kritis dilakukan dengan persamaan berikut.

$$V_c = 0,083 \cdot \beta \cdot \sqrt{f'_c} \cdot b_v \cdot d_v \quad (3.65)$$

Keterangan:

- V_c = tahanan geser yang disumbangkan oleh beton (kN)
 β = faktor indikasi kemampuan retak diagonal beton
 f'_c = kekuatan tekan beton yang direncanakan (MPa)
 b_v = lebar efektif badan gelagar (mm)
 d_v = kedalaman geser efektif (mm)
 V_p = kontribusi gaya prategang terhadap ketahanan geser (kN)
 P_{ef} = gaya prategang efektif (kN)
 y_{end} = jarak pusat penampang ke sisi bawah gelagar pada tumpuan (mm)
 y_{mid} = jarak pusat penampang ke sisi bawah gelagar pada tengah bentang (mm)
 r_{endon} = panjang tendon di setengah bentang (mm)
 ε_s = regangan longitudinal di baja tulangan
 M_u = momen ultimit di muka geser kritis (kNm)
 N_u = gaya aksial (kN)
 V_u = gaya geser ultimit di muka geser kritis (kN)

BAB IV

METODE PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Metode penelitian adalah cara atau prosedur yang dilakukan peneliti untuk menjalankan penelitian sehingga dapat mencapai tujuan dan mampu menjawab rumusan masalah penelitian. Untuk menjalankan prosedur tersebut serta agar didapatkan hasil yang optimal maka diperlukan data-data yang tepat untuk mendukung suatu penelitian.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan berdasarkan data Jembatan HKSN berlokasi di Jalan Kuin Utara, Kuin Utara, Kecamatan Banjarmasin Utara, Kota Banjarmasin, Kalimantan Selatan. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1.



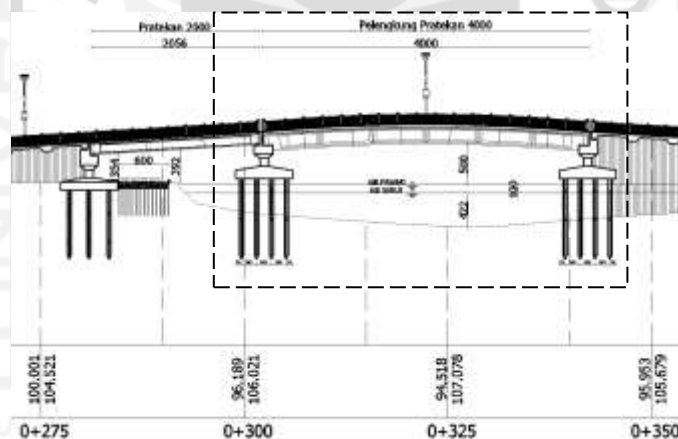
Gambar 4.1 Lokasi Penelitian (Jembatan HKSN)

4.3 Data Penelitian

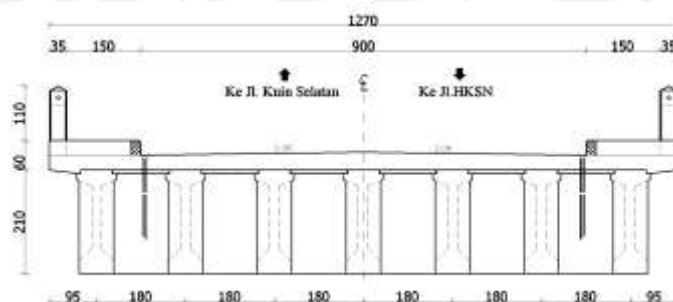
Untuk mendukung suatu penelitian maka diperlukan data-data sebagai dasar untuk melakukan analisis. Pada penelitian ini digunakan data sekunder yang didapatkan dari perencana Jembatan HKSJN dan juga data dari *Bridge Product* PT. Wijaya Karya Beton Tbk. Berikut adalah data-data yang diperlukan untuk melakukan penelitian pada Jembatan HKSJN.

1. Desain Jembatan HKSJN

Jembatan HKSJN didesain menggunakan beton prategang pada bentang utama sepanjang 40 m dan 20 m. Jembatan HKSJN didesain memiliki lebar total 12,7 m dengan lebar perkerasan jalan 9 m yang terdiri dari 2 lajur kendaraan, trotoar yang terletak di sisi kanan dan kiri masing-masing selebar 1,5 m, dan parapet 0,35 m. Desain Jembatan HKSJN dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.2 Tampak Samping Desain Jembatan HKSJN



Gambar 4.3 Potongan Melintang 0+325 Jembatan HKSJN

2. Desain Jembatan Penelitian

Pada penelitian ini, dilakukan penelitian perbandingan gelagar bentang 40 meter Jembatan HKS. Berdasarkan *Bridge Product* PT. Wijaya Karya Beton Tbk. untuk bentang 40 meter terdapat dua pilihan tipe *PCI-girder* yang dapat digunakan, yaitu *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut. Sehingga dipilih kedua tipe tersebut sebagai objek perbandingan pada penelitian ini.



Gambar 4.4 Katalog PCI-Girder PT. Wijaya Karya Beton Tbk.
(Sumber: *Bridge Product* PT. Wijaya Karya Beton Tbk.)

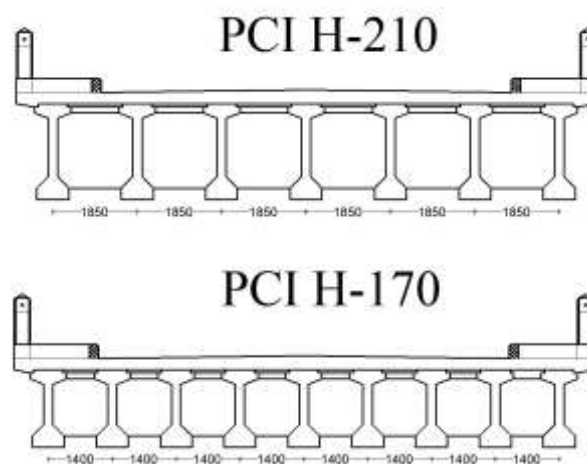
Penelitian ini hanya berfokus pada bentang 40 m Jembatan HKS saja dengan *PCI-girder* yang digunakan adalah jenis gelagar segmental sehingga terdapat beberapa sambungan pada gelagar. Berikut adalah Tabel 4.1 mengenai

spesifikasi *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm yang akan dibandingkan pada penelitian ini.

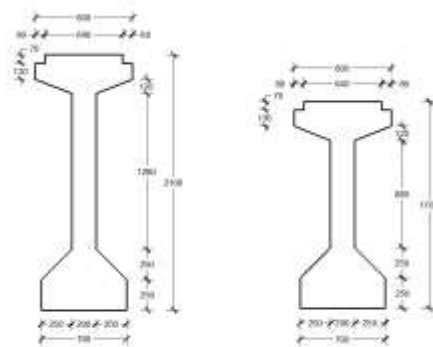
Tabel 4.1 Spesifikasi *PCI-Girder* H-210cm dan *PCI-Girder* H-170cm

Spesifikasi	<i>PCI-Girder</i> 210cm	<i>PCI-Girder</i> 170cm
Mutu beton	50 MPa	60 MPa
Panjang bentang	40 m	40 m
Panjang gelagar	40,6 m	40,6 m
Spasi antar gelagar	1,85 m	1,4 m
Jumlah gelagar	7	9
Jumlah diafragma	6	6
Letak diafragma	0 m, 8 m, 16 m, 24 m, 32 m, dan 40 m	0 m, 8 m, 16 m, 24 m, 32 m, dan 40 m
Letak sambungan dari tumpuan	5 m, 11 m, 17 m, 23 m, 29 m, 35 m	5 m, 11 m, 17 m, 23 m, 29 m, 35 m

Gambar detail gelagar mulai dari gambar struktur atas, dimensi penampang gelagar, hingga tampak samping gelagar dapat dilihat pada Gambar 4.5 hingga Gambar 4.7 berikut.

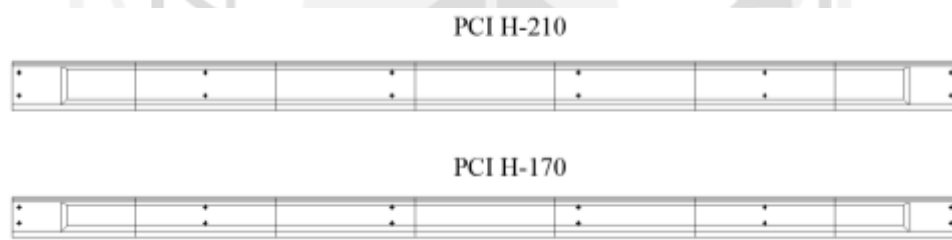


Gambar 4.5 Struktur Atas Jembatan HKSJN Menggunakan *PCI-Girder* H-210cm dan *PCI-Girder* H-170cm



PCI H-210 PCI H-170

Gambar 4.6 Detail Dimensi Penampang *PCI-Girder* H-210cm dan *PCI-Girder* H-170cm



Gambar 4.7 Tampak Samping *PCI-Girder* H-210cm dan *PCI-Girder* H-170cm

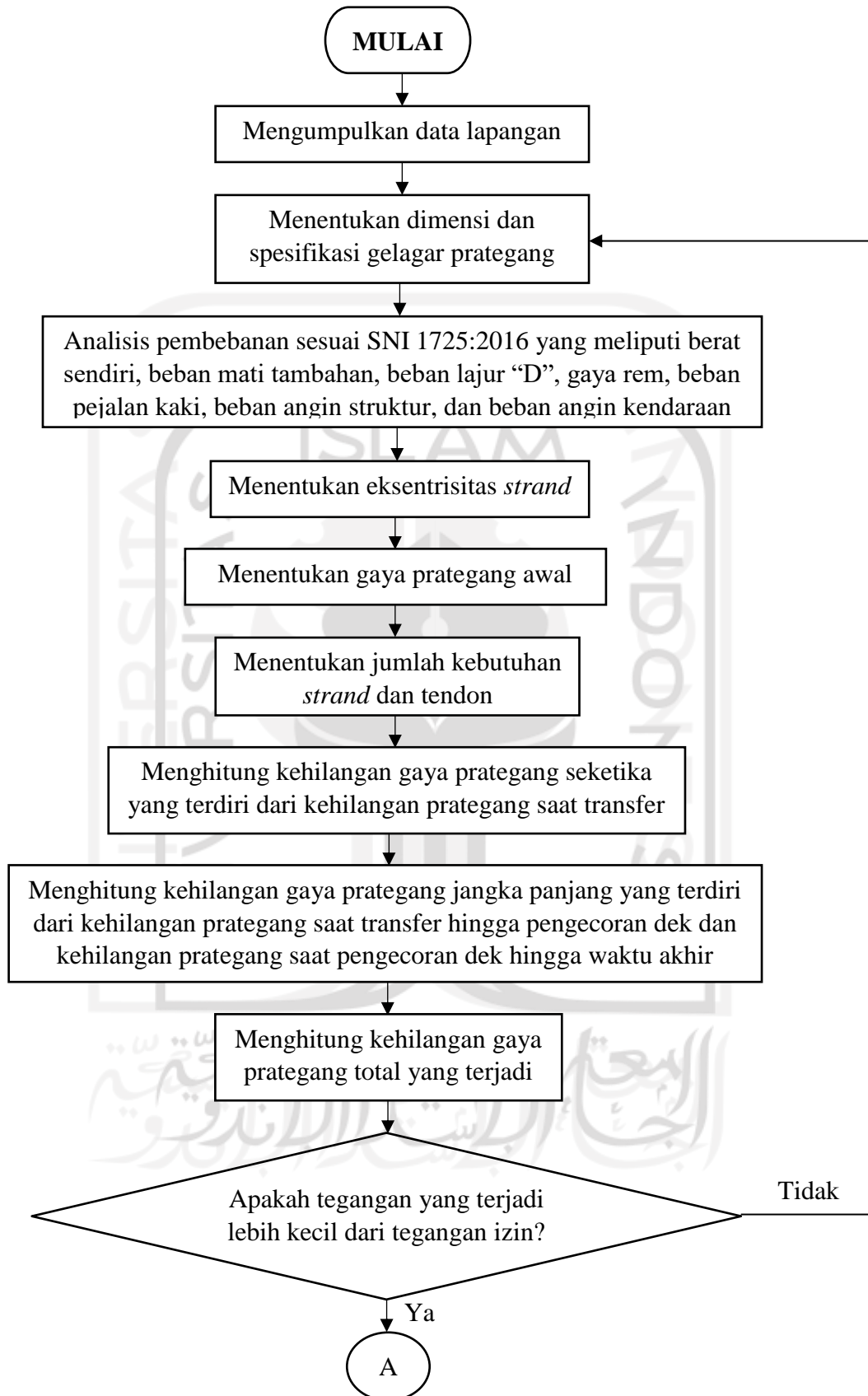
4.4 Tahapan Penelitian

Tahapan yang dilakukan dalam penelitian perbandingan penggunaan *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm pada bentang 40 meter Jembatan HKSN adalah sebagai berikut.

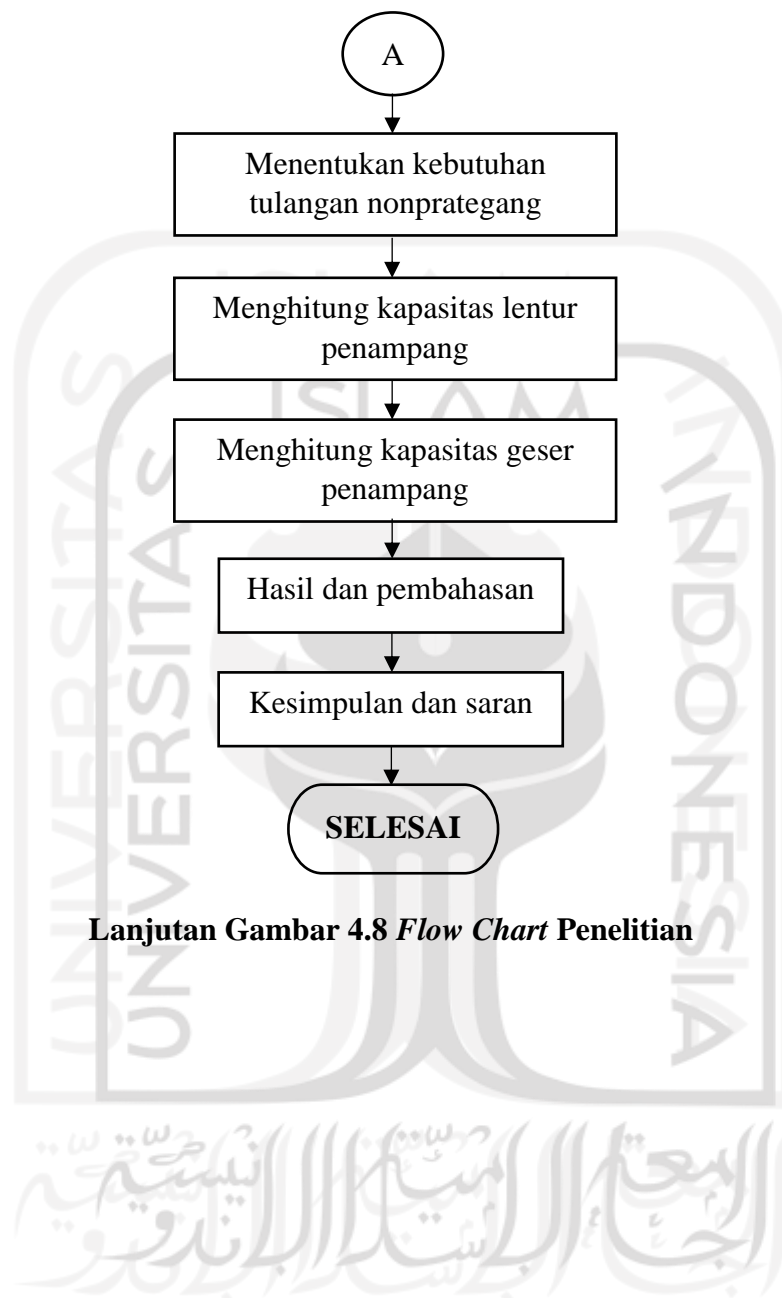
1. Mengumpulan data lapangan,
2. Menentukan dimensi dan spesifikasi gelagar prategang,
3. Melakukan perhitungan modulus penampang,
4. Menganalisis gelagar jembatan terhadap pembebanan sesuai SNI 1725:2016 yang meliputi berat sendiri, beban mati tambahan, beban lajur “D”, gaya rem, beban pejalan kaki, beban angin struktur, dan beban angin kendaraan,
5. Menentukan eksentrisitas *strand*,
6. Menentukan gaya prategang awal,

7. Menentukan jumlah kebutuhan *strand* dan tendon,
8. Menghitung kehilangan gaya prategang seketika yang terdiri dari kehilangan prategang saat transfer,
9. Menghitung kehilangan gaya prategang jangka panjang yang terdiri dari kehilangan prategang saat transfer hingga pengecoran dek dan kehilangan prategang saat pengecoran dek hingga waktu akhir,
10. Menghitung kehilangan gaya prategang total yang terjadi,
11. Melakukan pemeriksaan tegangan yang terjadi saat transfer, saat masa konstruksi, dan saat layan,
12. Melakukan pemeriksaan tegangan pada sambungan,
13. Menentukan kebutuhan tulangan nonprategang,
14. Menghitung kapasitas lentur penampang,
15. Menghitung kapasitas geser penampang, dan
16. Melakukan perbandingan hasil desain,





Gambar 4.8 Flow Chart Penelitian



Lanjutan Gambar 4.8 *Flow Chart* Penelitian

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Tinjauan Umum

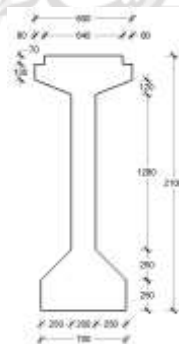
Desain Jembatan HKSJN pada penelitian ini dirancang menggunakan *PCI-girder* H-210cm dan *PCI-girder* H-170cm. Analisis *PCI-girder* tersebut dilakukan dengan bantuan program Ms. Excel 2016 dengan mengacu pada Pembebanan untuk Jembatan SNI 1725:2016 dan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No. 02/M/BM/2021.

5.2 *PCI-Girder* H-210cm

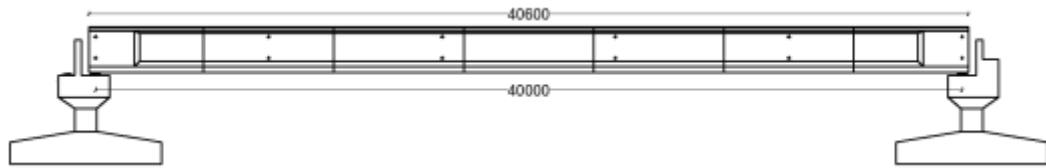
Pada subbab ini akan dilakukan analisis *PCI-girder* H-210cm. Berikut adalah gambar detail *PCI-girder* H-210cm yang dapat dilihat pada Gambar 5.1 sampai Gambar 5.3.



Gambar 5.1 Jembatan HKSJN Menggunakan *PCI-Girder* H-210cm



Gambar 5.2 Dimensi *PCI-Girder* H-210cm



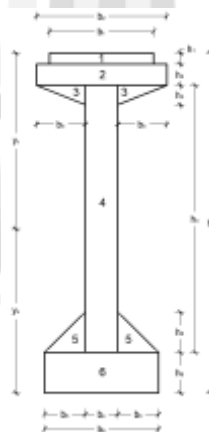
Gambar 5.3 Tampak Samping PCI-Girder H-210cm

5.2.1 Perhitungan Modulus Penampang *PCI-Girder H-210cm*

Modulus penampang muncul karena adanya tegangan yang diakibatkan oleh lentur. Tegangan lentur yang bekerja pada penampang gelagar menghasilkan tegangan yang berbeda antara lapisan atas dan lapisan bawah penampang. Lapisan atas dibatasi oleh titik berat penampang ke sisi atas penampang, sedangkan lapisan bawah dibatasi oleh titik berat penampang ke sisi bawah penampang.

1. Gelagar Prategang Nonkomposit

Sebelum dilakukan pengecoran pelat lantai, gelagar bersifat nonkomposit karena belum disatukan dengan pelat lantai. Untuk memudahkan perhitungan, penampang *PCI-girder H-210cm* dibagi menjadi beberapa bagian seperti Gambar 5.4 berikut.



Gambar 5.4 Pembagian Penampang PCI-Girder H-210cm

Berikut adalah contoh perhitungan untuk tampang 1 penampang *PCI-girder H-210cm* di atas.

$$\text{Tinggi gelagar } (h_g) = 2,1 \text{ m}$$

$$\text{Lebar tampang 1 } (b_1) = 0,64 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi tampang 1 } (h_1) = 0,07 \text{ m}$$

Luas tampang 1 (A_1)

$$A_1 = b_1 \cdot h_1$$

$$A_1 = 0,64 \cdot 0,07$$

$$A_1 = 0,045 \text{ m}^2$$

Jarak titik berat tampang 1 terhadap alas (y_1)

$$y_1 = h - \left(\frac{1}{2} \cdot h_1 \right)$$

$$y_1 = 2,1 - \left(\frac{1}{2} \cdot 0,07 \right)$$

$$y_1 = 2,065 \text{ m}$$

Inersia momen tampang 1 (I_{o1})

$$I_{o1} = \frac{1}{12} \cdot b_1 \cdot h_1^3$$

$$I_{o1} = \frac{1}{12} \cdot 0,64 \cdot 0,07^3$$

$$I_{o1} = 0,000018 \text{ m}^4$$

Perhitungan bagian penampang yang lain dilakukan dengan cara yang sama seperti di atas sehingga dihasilkan nilai seperti pada Tabel 5.1 berikut.

Tabel 5.1 Rekapitulasi Perhitungan Modulus Penampang Gelagar Nonkomposit

No	Dimensi		Luas Tampang	Jarak Titik Berat Tampang Terhadap Alas	Statis Momen	Inersia Momen	Inersia Momen
	Lebar	Tinggi					
	b_i	h_i					
	(m)	(m)					
			A_i	y_i	$A_i \cdot y_i$	$A_i \cdot y_i^2$	I_{oi}
			(m ²)	(m)	(m ³)	(m ⁴)	(m ⁴)
1	0,64	0,07	0,045	2,065	0,093	0,191	0,000018
2	0,8	0,13	0,104	1,965	0,204	0,402	0,000146
3	0,3	0,12	0,036	1,860	0,067	0,125	0,000029
4	0,2	1,65	0,330	1,075	0,355	0,381	0,074869
5	0,25	0,25	0,063	0,333	0,021	0,007	0,000217
6	0,7	0,25	0,175	0,125	0,022	0,003	0,000911
TOTAL			0,752		0,761	1,108	0,0762

Letak titik berat gelagar dari alas (y_b)

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

$$y_b = \frac{0,761}{0,752}$$

$$y_b = 1,012 \text{ m}$$

Letak titik berat gelagar dari atas (y_t)

$$y_t = h - y_b$$

$$y_t = 2,1 - 1,012$$

$$y_t = 1,088 \text{ m}$$

Momen inersia terhadap alas gelagar (I_b)

$$I_b = \sum A_i \cdot y_i^2 + \sum I_{oi}$$

$$I_b = 1,108 + 0,076$$

$$I_b = 1,184 \text{ m}^4$$

Momen inersia terhadap titik berat gelagar (I_g)

$$I_g = I_b - (A \cdot y_b^2)$$

$$I_g = 1,184 - (0,752 \cdot 1,012^2)$$

$$I_g = 0,414 \text{ m}^4$$

Tahanan momen sisi atas terhadap gelagar (S_t)

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

$$S_t = \frac{0,414}{1,088}$$

$$S_t = 0,380 \text{ m}^3$$

Tahanan momen sisi bawah gelagar (S_b)

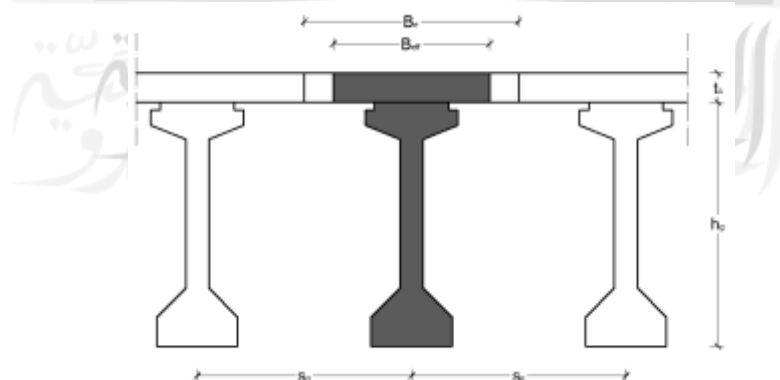
$$S_b = \frac{I_g}{y_b}$$

$$S_b = \frac{0,414}{1,012}$$

$$S_b = 0,409 \text{ m}^3$$

2. Lebar Efektif Pelat Lantai

Penentuan lebar efektif pelat lantai diilustrasikan seperti Gambar 5.5 berikut.



Gambar 5.5 Lebar Efektif Pelat Lantai

Nilai lebar efektif diambil nilai terkecil dari:

$$a. \frac{L_b}{4} = \frac{40}{4}$$

$$\frac{L_b}{4} = 10 \text{ m}$$

$$b. s_g = 1,85 \text{ m}$$

$$c. 12 \cdot t_s = 12 \cdot 0,25$$

$$12 \cdot t_s = 3 \text{ m}$$

Sehingga dipakai nilai lebar efektif $B_e = 1,85 \text{ m}$.

$$\text{Kuat tekan beton pelat} \quad (f'_{cd}) = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Kuat tekan beton gelagar} \quad (f'_{cg}) = 50 \text{ MPa}$$

$$\text{Berat jenis beton prategang} \quad (Y_c) = 2560 \text{ kg/m}^3$$

Modulus elastisitas pelat beton (E_{cd})

$$E_{cd} = 4700 \cdot \sqrt{f'_{cd}}$$

$$E_{cd} = 4700 \cdot \sqrt{35}$$

$$E_{cd} = 25742,960 \text{ MPa}$$

Modulus elastisitas gelagar (E_{cg})

$$E_{cg} = 0,043 \cdot Y_c^{1,5} \cdot \sqrt{f'_{cg}}$$

$$E_{cg} = 0,043 \cdot 2560^{1,5} \cdot \sqrt{50}$$

$$E_{cg} = 39383,418 \text{ MPa}$$

Perbandingan modulus elastisitas pelat dan gelagar (n)

$$n = \frac{E_{cd}}{E_{cg}}$$

$$n = \frac{25742,960}{39383,418}$$

$$n = 0,654$$

Lebar pengganti beton pelat lantai (B_{eff})

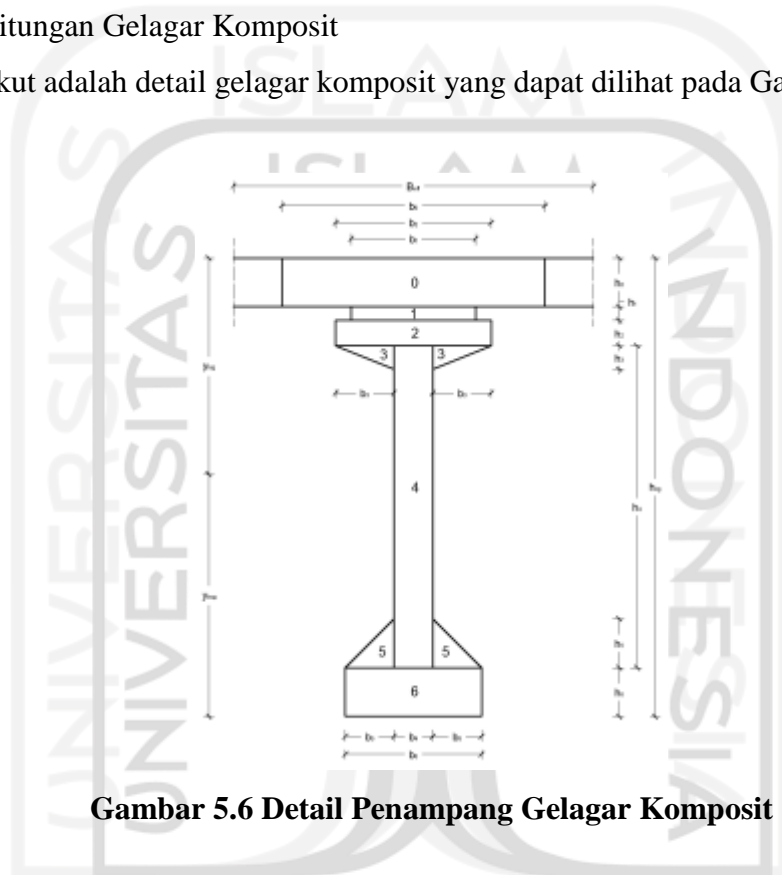
$$B_{eff} = n \cdot B_e$$

$$B_{eff} = 0,654 \cdot 1,85$$

$$B_{eff} = 1,209 \text{ m}$$

3. Perhitungan Gelagar Komposit

Berikut adalah detail gelagar komposit yang dapat dilihat pada Gambar 5.6.



Gambar 5.6 Detail Penampang Gelagar Komposit

Perhitungan gelagar komposit dilakukan sama seperti perhitungan gelagar nonkomposit sebagai berikut.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Perhitungan Modulus Penampang Gelagar Komposit

No	Dimensi		Luas Tampang	Jarak Titik Berat Tampang Terhadap Alas	Statis Momen	Inersia Momen	Inersia Momen
	Lebar	Tinggi					
	b_i	h_i	A_i	y_i	$A_i \cdot y_i$	$A_i \cdot y_i^2$	I_{oi}
	(m)	(m)	(m ²)	(m)	(m ³)	(m ⁴)	(m ⁴)
0	1,209	0,25	0,302	2,225	0,673	1,497	0,001575
1	0,64	0,07	0,045	2,065	0,093	0,191	0,000018
2	0,8	0,13	0,104	1,965	0,204	0,402	0,000146
3	0,3	0,12	0,036	1,860	0,067	0,125	0,000029
4	0,2	1,65	0,330	1,075	0,355	0,381	0,074869
5	0,25	0,25	0,063	0,333	0,021	0,007	0,000217
6	0,7	0,25	0,175	0,125	0,022	0,003	0,000911
TOTAL			1,055		1,434	2,605	0,078

Tabel 5.2 adalah rekapitulasi perhitungan modulus penampang gelagar komposit dengan tinggi (h_{cg}) adalah 2,35 m. Dengan rumus yang sama seperti perhitungan sebelum komposit sehingga menghasilkan nilai sebagai berikut.

Letak titik berat gelagar komposit dari alas (y_{bcg})

$$y_{bcg} = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}$$

$$y_{bcg} = \frac{1,434}{1,055}$$

$$y_{bcg} = 1,360 \text{ m}$$

Letak titik berat gelagar komposit dari atas (y_{tcg})

$$y_{tcg} = h_{cg} - y_{bcg}$$

$$y_{tcg} = 2,35 - 1,360$$

$$y_{tcg} = 0,990 \text{ m}$$

Momen inersia terhadap alas gelagar komposit (I_{bc})

$$I_{bc} = \sum A_i \cdot y_i^2 + \sum I_{oi}$$

$$I_{bc} = 2,605 + 0,078$$

$$I_{bc} = 2,683 \text{ m}^4$$

Momen inersia terhadap titik berat gelagar komposit (I_{cg})

$$I_{cg} = I_{bc} - (A \cdot y_{bcg}^2)$$

$$I_{cg} = 2,683 - (1,055 \cdot 1,360^2)$$

$$I_{cg} = 0,733 \text{ m}^4$$

Tahanan momen sisi atas terhadap gelagar komposit (S_{tcg})

$$S_{tcg} = \frac{I_{cg}}{y_{tcg}}$$

$$S_{tcg} = \frac{0,733}{0,990}$$

$$S_{tcg} = 0,740 \text{ m}^3$$

Tahanan momen sisi bawah gelagar komposit (S_{bcg})

$$S_{bcg} = \frac{I_{cg}}{y_{bcg}}$$

$$S_{bcg} = \frac{0,733}{1,360}$$

$$S_{bcg} = 0,539 \text{ m}^3$$

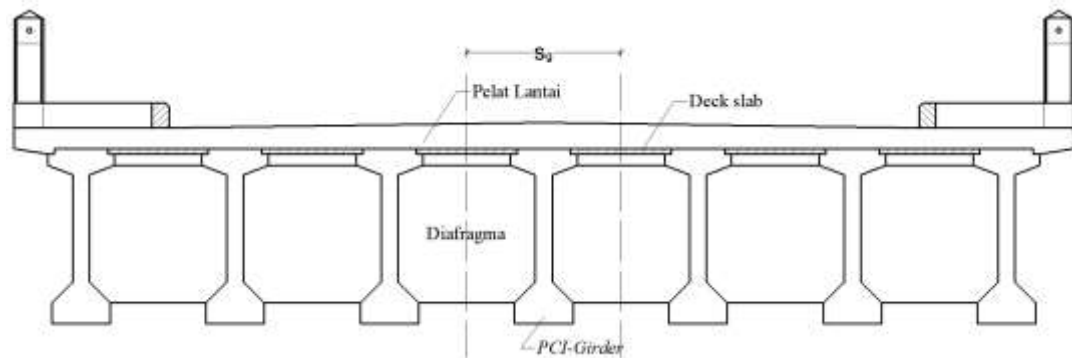
5.2.2 Pembebanan Gelagar

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

1. Berat Sendiri (MS)

Berat sendiri adalah berat bagian struktur tersebut ditambah bagian struktur lain yang dipikulnya. Berat sendiri gelagar terdiri dari berat pelat lantai, *deck slab*, balok prategang, dan diafragma. Untuk menghitung berat sendiri gelagar hanya perlu dilakukan pada salah satu gelagar yang menerima beban paling maksimum, yaitu gelagar yang terletak di tengah bentang melintang jembatan

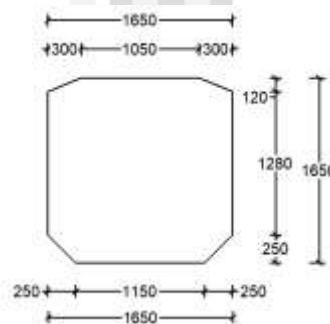
seperti pada Gambar 5.7. Hal itu karena pada tengah bentang melintang dilalui beban kendaraan, sementara pada bagian ujung bentang hanya dilalui beban pedestrian.



Gambar 5.7 Beban Gelagar Tengah Bentang

a. Berat Diafragma

Berikut adalah detail dimensi diafragma pada *PCI-girder* H-210cm seperti pada Gambar 5.8 berikut.



Gambar 5.8 Detail Dimensi Diafragma pada PCI-Girder H-210cm

Tebal diafragma (t_{dp}) = 0,2 m

Luas diafragma (A_{dp}) = 2,624 m²

Berat beton prategang (Y_c) = 25 kN/m³

Jumlah diafragma (n_{dp}) = 6

Panjang bentang (L) = 40 m

Berat 1 buah diafragma (W)

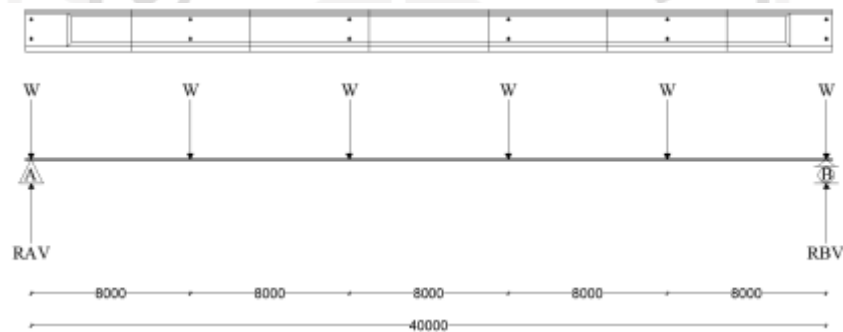
$$W = t_{dp} \cdot A_{dp} \cdot Y_c$$

$$W = 0,2 \cdot 2,624 \cdot 25$$

$$W = 13,12 \text{ kN}$$

Momen maksimum di tengah bentang (M_{maks})

Untuk mempermudah perhitungan momen maksimum akibat diafragma lihat Gambar 5.9.



Gambar 5.9 Pembebanan Gelagar Akibat Diafragma

Dari Gambar 5.9 M_{maks} terjadi di tengah bentang. Nilai M_{maks} tersebut adalah sebagai berikut.

$$M_{maks} = R_{AV} \cdot 20 - 20 \cdot W - 12 \cdot W - 4 \cdot W$$

$$M_{maks} = 0,5 \cdot n_{dp} \cdot W \cdot 20 - 36 \cdot W$$

$$M_{maks} = (10 \cdot n_{dp} - 36) \cdot W$$

$$M_{maks} = (10 \cdot 6 - 36) \cdot 13,12$$

$$M_{maks} = 314,88 \text{ kNm}$$

Berat diafragma ekuivalen (W_{dp})

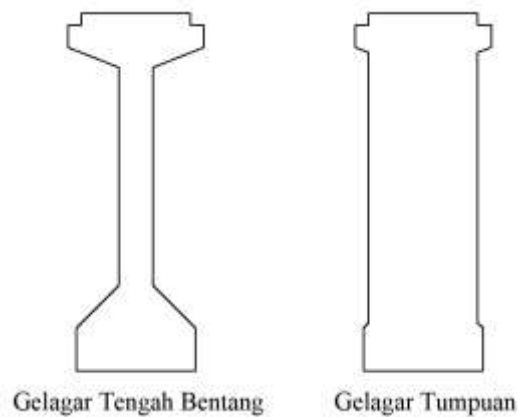
$$W_{dp} = \frac{8 \cdot M_{maks}}{L^2}$$

$$W_{dp} = \frac{8 \cdot 314,88}{40^2}$$

$$W_{dp} = 1,574 \text{ kN/m}$$

b. Berat Gelagar

Berikut adalah gambar penampang gelagar seperti pada Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Penampang Gelagar Tumpuan dan Tengah Bentang

Panjang gelagar $(L_b) = 40,6 \text{ m}$

Luas penampang tumpuan $(A_{tum}) = 1,48 \text{ m}^2$

Panjang gelagar tumpuan $(L_{tum}) = 4,2 \text{ m}$

Luas penampang tengah $(A_{mid}) = 0,752 \text{ m}^2$

Panjang gelagar tengah $(L_{mid}) = 36,4 \text{ m}$

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

Berat gelagar (W)

$$W = (A_{tum} \cdot L_{tum} + A_{mid} \cdot L_{mid}) \cdot Y_c$$

$$W = (1,48 \cdot 4,2 + 0,752 \cdot 36,4) \cdot 25$$

$$W = 763,585 \text{ kN}$$

Berat gelagar ekuivalen (W_g)

$$W_g = \frac{W}{L_b}$$

$$W_g = \frac{763,585}{40,6}$$

$$W_g = 18,808 \text{ kN/m}$$

c. Berat Deck Slab

$$\text{Lebar deck slab } (b_{DS}) = 1,21 \text{ m}$$

$$\text{Tebal deck slab } (h_{DS}) = 0,07 \text{ m}$$

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

$$\text{Luas deck slab } (A_{DS})$$

$$A_{DS} = b_{DS} \cdot h_{DS}$$

$$A_{DS} = 1,21 \cdot 0,07$$

$$A_{DS} = 0,085 \text{ m}^2$$

$$\text{Berat Deck Slab } (W_{DS})$$

$$W_{DS} = A_{DS} \cdot Y_c$$

$$W_{DS} = 0,085 \cdot 25$$

$$W_{DS} = 2,118 \text{ kN/m}$$

d. Berat Pelat Lantai

$$\text{Lebar pelat lantai } (b_s) = 1,85 \text{ m}$$

$$\text{Tebal pelat lantai } (h_s) = 0,25 \text{ m}$$

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

$$\text{Luas pelat lantai } (A_s)$$

$$A_s = b_s \cdot h_s$$

$$A_s = 1,85 \cdot 0,25$$

$$A_s = 0,463 \text{ m}^2$$

$$\text{Berat pelat lantai } (W_s)$$

$$W_s = A_s \cdot Y_c$$

$$W_s = 0,463 \cdot 25$$

$$W_s = 11,563 \text{ kN/m}$$

Dari perhitungan di atas, rekapitulasi perhitungan berat sendiri gelagar dapat dilihat pada Tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.3 Rekapitulasi Perhitungan Berat Sendiri Gelagar

No	Jenis beban berat sendiri	Berat	Geser	Momen
		W	V_{MS}	M_{MS}
		(kN/m)	(kN)	(kNm)
			$\frac{1}{2} \cdot W \cdot L$	$\frac{1}{8} \cdot W \cdot L^2$
1	Pelat lantai	11,563	234,719	2382,395
2	Deck slab	2,118	42,985	436,300
3	Gelagar	18,808	381,792	3875,191
4	Diafragma	1,574	31,960	324,397
TOTAL		34,062	691,457	7018,284

2. Beban Mati Tambahan (MA)

Beban mati tambahan adalah beban akibat elemen nonstruktural jembatan. Pada pembebanan gelagar, beban mati tambahan berupa beban aspal, beban air hujan, *barrier*, dan trotoar. Beban air hujan adalah asumsi air yang menggenang jika terjadi penyumbatan pada sistem drainase.

a. Berat *Barrier*

Beban *barrier* dan trotoar dihitung dengan membagikan berat total ke semua gelagar dan dianggap sebagai beban merata pada gelagar. Meskipun pada kenyataannya beban *barrier* dan trotoar hanya ada di tepi, namun untuk mempermudah perhitungan beban tersebut bisa dianggap merata pada semua gelagar. Hal ini karena jembatan cukup kaku sehingga deformasi yang terjadi bisa seragam tidak hanya setempat sehingga beban bisa didistribusikan secara merata.

$$\text{Luas permukaan } \textit{barrier} \quad (A_{br}) = 0,4725 \text{ m}^2$$

$$\text{Tebal } \textit{barrier} \quad (t_{br}) = 0,2 \text{ m}$$

$$\text{Jumlah } \textit{barrier} \quad (n_{br}) = 36$$

$$\text{Jumlah gelagar} \quad (n_g) = 7$$

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

$$\text{Panjang bentang} \quad (L) = 40 \text{ m}$$

Berat *barrier* pada tiap gelagar (W_{br})

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

$$W_{br} = \frac{0,4725 \cdot 0,2 \cdot 36 \cdot 25}{40 \cdot 7}$$

$$W_{br} = 0,304 \text{ kN/m}$$

b. Berat Trotoar

Luas permukaan trotoar (A_{tr}) = 0,449 m²

Tebal trotoar (t_{tr}) = 40 m

Jumlah trotoar (n_{tr}) = 2

Jumlah gelagar (n_g) = 7

Berat volume beton (Y_c) = 25 kN/m³

Panjang bentang (L) = 40 m

Berat trotoar pada tiap gelagar (W_{tr})

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

$$W_{tr} = \frac{0,449 \cdot 40 \cdot 2 \cdot 25}{40 \cdot 7}$$

$$W_{tr} = 3,208 \text{ kN/m}$$

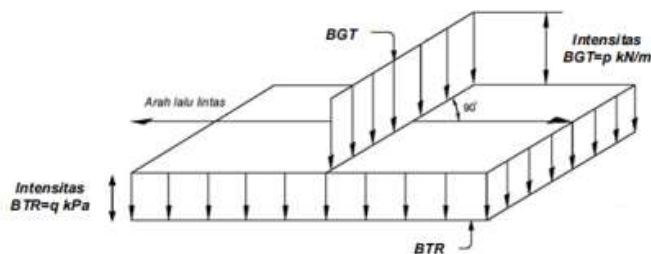
Perhitungan beban mati tambahan gelagar dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Perhitungan Beban Mati Tambahan Gelagar

No	Jenis Beban Berat Sendiri	Lebar	Tebal	Luas	Berat volume	Berat	Geser	Momen
		b_i	h_i	A_i	Y_i	w	V_{MA}	M_{MA}
		(m)	(m)	(m ²)	(kN/m ³)	(kN/m)	(kN)	(kNm)
						$A_i \cdot Y_i$	$\frac{1}{2} \cdot W \cdot L$	$\frac{1}{8} \cdot W \cdot L^2$
1	Lapisan aspal	1,85	0,05	0,093	22	2,035	41,311	419,302
2	Air hujan	1,85	0,05	0,093	9,8	0,907	18,402	186,780
3	Barrier					0,304	6,166	62,586
4	Trotoar					3,208	65,122	660,993
TOTAL						6,453	131,001	1329,661

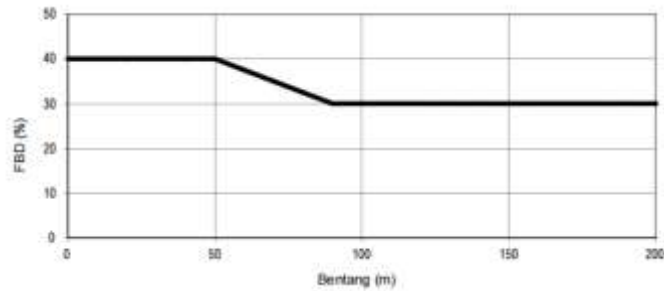
3. Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” adalah beban yang bekerja pada seluruh jalur kendaraan yang menimbulkan pengaruh ekuivalen dengan iring-iringan kendaraan yang masuk ke jembatan. Beban lajur “D” terdiri dari dua jenis beban yaitu beban merata (BTR) dan beban terpusat (BGT) yang dipikul di atas balok satu dimensi seperti pada Gambar 5.11.

**Gambar 5.11 Pembebanan Lajur “D”**

Sumber: SNI 1725:2016

Dalam perhitungannya, beban BGT yang merupakan beban panjang harus dikalikan dengan faktor beban dinamis (FBD). Hal ini karena beban hidup jembatan adalah beban dinamis, namun dalam perhitungannya menggunakan metode statis, sehingga perlu dikalikan dengan FBD . Sedangkan BTR yang merupakan beban luasan tidak perlu dikalikan dengan FBD . Nilai FBD sendiri dapat ditentukan dengan grafik pada Gambar 5.12.



Gambar 5.12 Faktor Beban Dinamis untuk Pembebanan Lajur “D”

Sumber: SNI 1725:2016

Berikut adalah perhitungan beban lajur “D” untuk *PCI-girder* H-210cm.

Panjang gelagar $(L) = 40 \text{ m}$

Jarak antar gelagar $(s_g) = 1,85 \text{ m}$

Beban terbagi rata (q_{BTR})

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

$$q_{BTR} = 9 \cdot \left(0,5 + \frac{15}{40} \right)$$

$$q_{BTR} = 7,875 \text{ kN/m}^2$$

Beban merata pada gelagar (W_{BTR})

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

$$W_{BTR} = 7,875 \cdot 1,85$$

$$W_{BTR} = 14,569 \text{ kN/m}$$

Beban garis terpusat (BGT) = 49 kN/m

Faktor beban dinamis (FBD) = 40%

Beban terpusat pada balok (P_{BGT})

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

$$P_{BGT} = (1 + 0,4) \cdot 49 \cdot 1,85$$

$$P_{BGT} = 126,91 \text{ kN}$$

Gaya geser (V_{TD})

$$V_{TD} = \left(\frac{1}{2} \cdot W_{BTR} \cdot L \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot P_{BGT} \right)$$

$$V_{TD} = \left(\frac{1}{2} \cdot 14,569 \cdot 40 \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot 126,91 \right)$$

$$V_{TD} = 354,83 \text{ kN}$$

Momen maksimum (M_{TD})

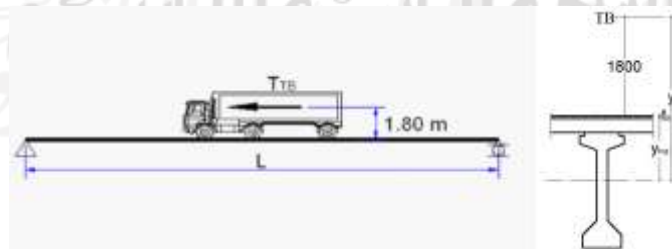
$$M_{TD} = \left(\frac{1}{8} \cdot W_{BTR} \cdot L^2 \right) + \left(\frac{1}{4} \cdot P_{BGT} \cdot L \right)$$

$$M_{TD} = \left(\frac{1}{8} \cdot 14,569 \cdot 40^2 \right) + \left(\frac{1}{4} \cdot 126,91 \cdot 40 \right)$$

$$M_{TD} = 4182,85 \text{ kNm}$$

4. Gaya Rem (T_B)

Menurut SNI 1725:2016 nilai gaya rem harus diambil dari nilai terbesar antara 25% dari berat gandar truk desain atau 5% dari berat truk rencana ditambah beban lajur terbagi rata *BTR*. Gaya rem tersebut ditempatkan di semua lajur rencana yang dimuati dan diasumsikan bekerja pada jarak 1,8 m di atas permukaan jalan secara horizontal. Ilustrasi pembebanan akibat gaya rem dapat dilihat pada Gambar 5.13.



Gambar 5.13 Pembebanan Akibat Gaya Rem

Beban gandar belakang (P_1) = 225 kN

Beban gandar tengah (P_2) = 225 kN

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

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

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

Beban lajur terbagi rata $(q_{BTR}) = 7,875 \text{ kN/m}^2$

Panjang bentang $(L) = 40 \text{ m}$

Jumlah lajur $(n_L) = 2$

Jumlah gelagar yang terbebani $(n_g) = 5$

Lebar jalan $(W_r) = 9 \text{ m}$

Beban BTR yang bekerja di semua lajur (P_{BTR})

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

$$P_{BTR} = 7,875 \cdot 9 \cdot 40$$

$$P_{BTR} = 2835 \text{ kN}$$

Gaya rem (TB)

Gaya rem dipilih nilai terbesar antara TB_1 dan TB_2

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

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

$$TB_1 = 25\% \cdot \frac{2 \cdot 225}{5}$$

$$TB_1 = 22,5 \text{ kN}$$

Atau

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

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

$$TB_2 = 5\% \cdot \left(\frac{500 \cdot 2 + 2835}{5} \right)$$

$$TB_2 = 38,350 \text{ kN}$$

Berdasarkan hasil di atas maka nilai TB yang dipakai adalah 38,350 kN.

Tebal aspal $(t_a) = 0,05$ m

Titik berat balok komposit $(y_{icg}) = 0,990$ m

Panjang lengan terhadap titik berat balok (y)

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

$$y = 1,8 + 0,990 + 0,05$$

$$y = 2,840 \text{ m}$$

Beban momen akibat gaya rem (M)

$$M = TB \cdot y$$

$$M = 38,35 \cdot 2,840$$

$$M = 108,926 \text{ kNm}$$

Gaya geser (V_{TB})

$$V_{TB} = \frac{M}{L}$$

$$V_{TB} = \frac{108,926}{40}$$

$$V_{TB} = 2,723 \text{ kN}$$

Momen maksimum (M_{TB})

$$M_{TB} = \frac{1}{2} \cdot M$$

$$M_{TB} = \frac{1}{2} \cdot 108,926$$

$$M_{TB} = 54,463 \text{ kNm}$$

5. Beban Pejalan Kaki (TP)

Berdasarkan SNI 1725:2016 bahwa untuk trotoar dengan lebar lebih dari 600 mm maka beban pejalan kaki sebesar 5 kN/m^2 harus diterapkan di sepanjang trotoar.

Jumlah trotoar $(n_{tr}) = 2$

Beban pejalan kaki $(W) = 5 \text{ kN/m}^2$

Lebar trotoar $(b_{tr}) = 1500 \text{ mm}$

Panjang bentang (L) = 40 m

Jumlah gelagar (n_g) = 7

Beban pejalan kaki (TP)

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

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

$$TP = 15 \text{ kN/m}$$

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

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

$$W_{TP} = \frac{15}{7}$$

$$W_{TP} = 2,143 \text{ kN/m}$$

Momen akibat beban pejalan kaki (M_{TP})

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

$$M_{TP} = \frac{1}{8} \cdot 2,143 \cdot 40^2$$

$$M_{TP} = 428,571 \text{ kNm}$$

Gaya geser (V_{TP})

$$V_{TP} = \frac{1}{2} \cdot W_{TP} \cdot L$$

$$V_{TP} = \frac{1}{2} \cdot 2,143 \cdot 40$$

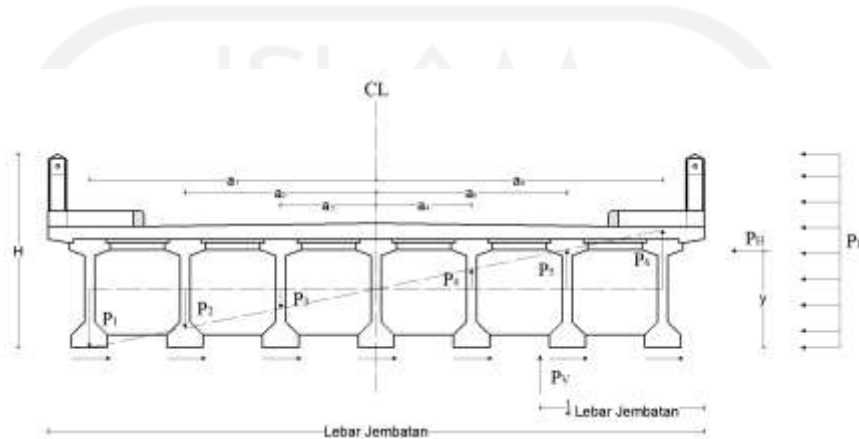
$$V_{TP} = 42,857 \text{ kN}$$

6. Beban Angin (EW)

Pembebanan akibat beban angin diasumsikan terdistribusi merata pada semua permukaan yang terekspos oleh angin. Pembebanan diambil tegak lurus arah angin dan harus divariasikan agar mendapatkan nilai yang paling membahayakan bagi struktur.

a. Beban angin struktur (EW_s)

Beban angin struktur adalah angin yang diterima oleh jembatan ketika jembatan kosong tanpa adanya kendaraan. Atau dengan kata lain angin tersebut hanya menimpa struktur jembatan saja. Beban angin struktur diilustrasikan seperti pada Gambar 5.14.



Gambar 5.14 Pembebanan Akibat Beban Angin Kendaraan

Tekanan angin (P_D) seperti pada Gambar 5.14 diilustrasikan bergerak dari arah kanan jembatan. Angin yang bergerak tersebut akan mengakibatkan tekanan secara horizontal (P_H) dan tekanan secara vertikal (P_V). Titik tangkap P_H yaitu pada 0,5 tinggi struktur atas jembatan (y), sedangkan titik tangkap P_V yaitu pada $\frac{1}{4}$ lebar jembatan. Akibat dari tekanan angin tersebut, jembatan akan mengalami guling momen dengan sumbu putar pada garis tengah jembatan (CL) sehingga akan menekan gelagar 1, gelagar 2, dan gelagar 3, serta mengangkat gelagar 4, gelagar 5, dan gelagar 6. Besar tekanan tersebut berbanding lurus dengan semakin jauhnya letak gelagar dari garis tengah jembatan sehingga tekanan terbesar akan dialami oleh gelagar yang letaknya paling jauh dari garis tengah jembatan yaitu tekanan pada gelagar 1 (P_1). Berikut adalah analisis beban angin struktur (EW_s).

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

Panjang gesekan di hulu jembatan (Z_o) = 2,5 m

Elevasi struktur	(Z)	= 8,75 m
Kecepatan angin rencana	(V_B)	= 126 km/jam
Kecepatan angin pada elevasi struktur	(V_{10})	= 126 km/jam
Tekanan angin dasar	(P_B)	= 0,0024 MPa
Tinggi struktur atas	(h_{ts})	= 3,75 m
Panjang bentang jembatan	(L)	= 40 m
Lebar jembatan	(B)	= 12,7 m
Kecepatan angin rencana pada elevasi rencana	(V_{DZ})	

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

$$V_{DZ} = 2,5 \cdot 19,3 \cdot \left(\frac{126}{126} \right) \cdot \ln \left(\frac{8,75}{2,5} \right)$$

$$V_{DZ} = 60,446 \text{ km/jam}$$

Tekanan angin rencana (P_D)

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

$$P_D = 0,0024 \cdot \left(\frac{60,446}{126} \right)^2$$

$$P_D = 0,000552 \text{ MPa}$$

$$P_D = 0,552 \text{ kN/m}^2$$

Luas kontak (A)

$$A = h_{ts} \cdot L$$

$$A = 3,75 \cdot 40$$

$$A = 150 \text{ m}^2$$

Gaya horizontal (P_H)

$$P_H = P_D \cdot A$$

$$P_H = 0,552 \cdot 150$$

$$P_H = 82,85 \text{ kN}$$

Gaya horizontal per meter panjang jembatan

$$\frac{P_H}{L} = \frac{P_H}{40}$$

$$\frac{P_H}{L} = 2,071 \text{ kN/m}$$

Berdasarkan SNI 1725:2016 pasal 9.6.1.1 maka gaya total beban angin tidak boleh kurang dari 4,4 kN/m. Sehingga beban angin yang digunakan adalah 4,4 kN/m. Sehingga nilai gaya horizontal menjadi sebagai berikut.

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

$$P_H = 4,4 \cdot 40$$

$$P_H = 176 \text{ kN}$$

Titik tangkap (y)

$$y = \frac{1}{2} \cdot h_{ts}$$

$$y = \frac{1}{2} \cdot 3,75$$

$$y = 1,875 \text{ m}$$

Momen guling akibat gaya horizontal (M_H)

$$M_H = P_H \cdot y$$

$$M_H = 176 \cdot 1,875$$

$$M_H = 330 \text{ kNm}$$

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

Berdasarkan Gambar 5.14 untuk mencari nilai P_{1H} dilakukan dengan rumus sebagai berikut.

$$M = P \cdot y$$

dimana

$$P_1; P_2 = \frac{a_2}{a_1} \cdot P_1; P_3 = \frac{a_3}{a_1} \cdot P_1; P_4 = \frac{a_4}{a_1} \cdot P_1; P_5 = \frac{a_5}{a_1} \cdot P_1; P_6 = P_1$$

Sehingga,

$$M = P_1 \cdot a_1 + P_2 \cdot a_2 + P_3 \cdot a_3 + P_4 \cdot a_4 + P_5 \cdot a_5 + P_6 \cdot a_6$$

$$M = P_1 \cdot a_1 + \frac{a_2}{a_1} \cdot P_1 \cdot a_2 + \frac{a_3}{a_1} \cdot P_1 \cdot a_3 + \frac{a_4}{a_1} \cdot P_1 \cdot a_4 + \frac{a_5}{a_1} \cdot P_1 \cdot a_5 + P_1 \cdot a_6$$

$$M = \left(\frac{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2}{a_1} \right) \cdot P_1$$

$$P_1 = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2} \right) \cdot M$$

$$P_{1H} = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2} \right) \cdot M_H$$

Dimana:

a_1 = jarak as gelagar 1 terhadap garis tengah jembatan

$$a_1 = 5,55 \text{ m}$$

a_2 = jarak as gelagar 2 terhadap garis tengah jembatan

$$a_2 = 3,7 \text{ m}$$

a_3 = jarak as gelagar 3 terhadap garis tengah jembatan

$$a_3 = 1,85 \text{ m}$$

a_4 = jarak as gelagar 4 terhadap garis tengah jembatan

$$a_4 = 1,85 \text{ m}$$

a_5 = jarak as gelagar 5 terhadap garis tengah jembatan

$$a_5 = 3,7 \text{ m}$$

a_6 = jarak as gelagar 6 terhadap garis tengah jembatan

$$a_6 = 5,55 \text{ m}$$

Sehingga nilai P_{1H} adalah sebagai berikut.

$$P_{1H} = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2} \right) \cdot M_H$$

$$P_{1H} = \left(\frac{5,55}{5,55^2 + 3,7^2 + 1,85^2 + 5,55^2 + 3,7^2 + 1,85^2} \right) \cdot 330$$

$$P_{1H} = 19,112 \text{ kN}$$

Gaya vertikal (P_V)

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

$$P_V = 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot 12,7 \cdot 40$$

$$P_V = 0,488 \text{ kN}$$

Momen guling akibat gaya vertikal (M_V)

$$M_V = \frac{1}{4} \cdot B \cdot P_V$$

$$M_V = \frac{1}{4} \cdot 12,7 \cdot 0,488$$

$$M_V = 1,548 \text{ kNm}$$

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

$$P_{1V} = \left(\frac{a_1}{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2 + a_5^2 + a_6^2} \right) \cdot M_V$$

$$P_{1H} = \left(\frac{5,55}{5,55^2 + 3,7^2 + 1,85^2 + 5,55^2 + 3,7^2 + 1,85^2} \right) \cdot 1,548$$

$$P_{1V} = 0,09 \text{ kN}$$

Gaya angin struktur (EW_s)

$$EW_s = P_{1H} + P_{1V}$$

$$EW_s = 19,112 + 0,09$$

$$EW_s = 19,202 \text{ kN}$$

Beban merata akibat angin struktur (W_{EW_s})

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

$$W_{EW_s} = \frac{19,202}{40}$$

$$W_{EW_s} = 0,48 \text{ kN/m}$$

Gaya geser (V_{EW_s})

$$V_{EW_s} = \frac{1}{2} \cdot W_{EW_s} \cdot L$$

$$V_{EW_s} = \frac{1}{2} \cdot 0,48 \cdot 40$$

$$V_{EW_s} = 9,601 \text{ kN}$$

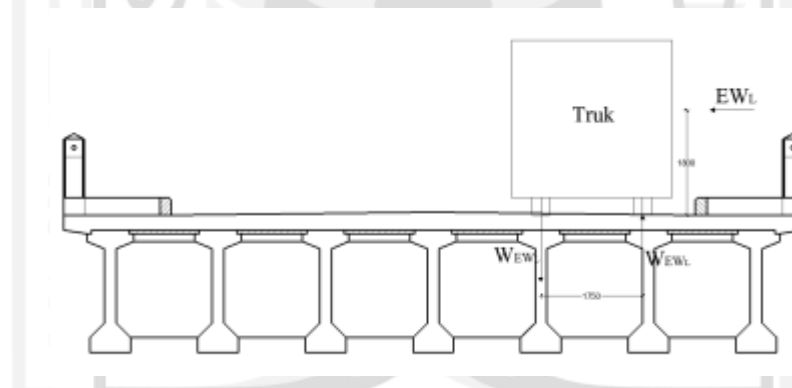
Momen maksimum (M_{EW_s})

$$M_{EW_s} = \frac{1}{8} \cdot W_{EW_s} \cdot L^2$$

$$M_{EW_s} = \frac{1}{8} \cdot 0,48 \cdot 40^2$$

$$M_{EW_s} = 96,008 \text{ kNm}$$

b. Beban angin kendaraan (EW_L)



Gambar 5.15 Pembebanan Akibat Beban Angin Kendaraan

Beban angin kendaraan seperti diilustrasikan Gambar 5.15 adalah tekanan angin terhadap kendaraan sehingga kendaraan mengalami beban guling dengan sumbu putar pada garis tengah gandar truk tersebut.. Akibat beban guling tersebut maka gandar truk tersebut mengalami gaya angkat dan gaya tekan (W_{EW_L}). Berdasarkan SNI 1725:2016, tekanan angin tersebut bekerja 1800 mm di atas permukaan jalan sebesar 1,46 N/mm.

Tekanan angin (EW_L) = 1,46 kN/m

Titik tangkap (y) = 1,8 m

Jarak antar gandar (x) = 1,75 m

Beban merata akibat angin kendaraan (W_{EW_L})

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

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

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

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

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

Gaya geser (V_{EW_L})

$$V_{EW_L} = \frac{1}{2} \cdot W_{EW_L} \cdot L$$

$$V_{EW_L} = \frac{1}{2} \cdot 1,502 \cdot 40$$

$$V_{EW_L} = 30,034 \text{ kN}$$

Momen maksimum (M_{EW_L})

$$M_{EW_L} = \frac{1}{8} \cdot W_{EW_L} \cdot L^2$$

$$M_{EW_L} = \frac{1}{8} \cdot 1,502 \cdot 40^2$$

$$M_{EW_L} = 300,343 \text{ kNm}$$

Dari perhitungan di atas, hasil rekapitulasi perhitungan pembebanan pada *PCI-girder* H-210cm dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan Tabel 5.6.

Tabel 5.5 Rekapitulasi Hasil Pembebanan pada PCI-Girder H-210cm

Jenis Pembebanan	Kode Beban	W	P	M	Keterangan
		(kN/m)	(kN)	kNm	
Berat Sendiri	<i>MS</i>	34,062	-	-	Beban merata, W_{MS}
Beban Mati Tambahan	<i>MA</i>	6,453	-	-	Beban merata, W_{MA}
Beban Lajur "D"	<i>TD</i>	14,569	126,910	-	Beban merata, W_{TD} dan beban terpusat, P_{TD}
Gaya Rem	<i>TB</i>	-	-	108,926	Beban momen, M_{TB}
Beban Angin Struktur	EW_s	0,480	-	-	Beban merata, W_{EW_s}
Beban Angin Kendaraan	EW_L	1,502	-	-	Beban merata, W_{EW_L}
Pejalan Kaki	<i>TP</i>	2,143	-	-	Beban merata, W_{TP}

Tabel 5.6 Rekapitulasi Perhitungan Gaya Geser dan Momen Maksimum Akibat Pembebanan pada PCI-Girder H-210cm

Jenis Pembebanan	Kode Beban	Gaya Geser	Momen Maksimum
		(kN)	(kNm)
Berat Sendiri	<i>MS</i>	691,457	7018,284
Beban Mati Tambahan	<i>MA</i>	131,001	1329,661
Beban Lajur "D"	<i>TD</i>	354,830	4182,850
Gaya Rem	<i>TB</i>	2,723	54,463
Beban Angin Struktur	EW_s	9,601	96,008
Beban Angin Kendaraan	EW_L	30,034	300,343
Pejalan Kaki	<i>TP</i>	42,857	428,571
Total		1262.503	13410,180

Setelah perhitungan pembebanan selesai, selanjutnya dilakukan perhitungan kombinasi pembebanan dengan dasar SNI 1725:2016. Berikut adalah perhitungan kombinasi pembebanan dengan faktor beban sesuai Tabel 3.13.

Tabel 5.7 Persamaan Perhitungan Momen dan Gaya Geser pada Jarak Tertentu

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

Dengan persamaan seperti pada Tabel 5.7 maka didapatkan hasil seperti pada Tabel 5.8 dan Tabel 5.9.

Tabel 5.8 Momen pada Gelagar Akibat Beban

Jarak x (m)	Momen pada Gelagar Akibat Beban							
	Berat Gelagar (kNm)	Berat Sendiri (kNm)	Mati Tambahan (kNm)	Lajur "D" (kNm)	Rem (kNm)	Angin Struktur (kNm)	Angin Kendaraan (kNm)	Pejalan Kaki (kNm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	18.808	664.207	125.838	347.546	2.723	9.361	29.283	41.786
2	37.615	1294.352	245.224	680.523	5.446	18.242	57.065	81.429
3	56.423	1890.435	358.156	998.931	8.169	26.642	83.345	118.929
4	75.230	2452.457	464.634	1302.770	10.893	34.563	108.123	154.286
5	94.038	2980.416	564.660	1592.041	13.616	42.004	131.400	187.500
6	112.845	3474.314	658.232	1866.743	16.339	48.964	153.175	218.571
7	131.653	3934.149	745.351	2126.876	19.062	55.445	173.448	247.500
8	150.460	4359.923	826.016	2372.440	21.785	61.445	192.219	274.286
9	169.268	4751.635	900.229	2603.436	24.508	66.966	209.489	298.929
10	188.075	5109.285	967.988	2819.863	27.232	72.006	225.257	321.429
11	206.883	5432.873	1029.294	3021.721	29.955	76.567	239.523	341.786
12	225.690	5722.399	1084.147	3209.010	32.678	80.647	252.288	360.000
13	244.498	5977.863	1132.546	3381.731	35.401	84.247	263.551	376.071

Lanjutan Tabel 5.8 Momen pada Gelagar Akibat Beban

Jarak x (m)	Momen pada Gelagar Akibat Beban							
	Berat Gelagar (kNm)	Berat Sendiri (kNm)	Mati Tambahan (kNm)	Lajur "D" (kNm)	Rem (kNm)	Angin Struktur (kNm)	Angin Kendaraan (kNm)	Pejalan Kaki (kNm)
14	263.305	6199.266	1174.492	3539.883	38.124	87.367	273.312	390.000
15	282.113	6386.606	1209.985	3683.466	40.847	90.008	281.571	401.786
16	300.920	6539.885	1239.025	3812.480	43.571	92.168	288.329	411.429
17	319.728	6659.101	1261.611	3926.926	46.294	93.848	293.585	418.929
18	338.535	6744.256	1277.744	4026.803	49.017	95.048	297.339	424.286
19	357.343	6795.349	1287.424	4112.111	51.740	95.768	299.592	427.500
20	376.150	6812.380	1290.651	4182.850	54.463	96.008	300.343	428.571

Tabel 5.9 Gaya Geser pada Gelagar Akibat Beban

Jarak x (m)	Gaya Geser pada Gelagar Akibat Beban							
	Berat Gelagar (kNm)	Berat Sendiri (kNm)	Mati Tambahan (kNm)	Lajur "D" (kNm)	Rem (kNm)	Angin Struktur (kNm)	Angin Kendaraan (kNm)	Pejalan Kaki (kNm)
0	0	681.238	129.065	354.830	2.723	9.601	30.034	42.857
1	18.808	647.176	122.612	340.261	2.723	9.121	28.533	40.714
2	37.615	613.114	116.159	325.693	2.723	8.641	27.031	38.571
3	56.423	579.052	109.705	311.124	2.723	8.161	25.529	36.429
4	75.230	544.990	103.252	296.555	2.723	7.681	24.027	34.286
5	94.038	510.929	96.799	281.986	2.723	7.201	22.526	32.143
6	112.845	476.867	90.346	267.418	2.723	6.721	21.024	30.000
7	131.653	442.805	83.892	252.849	2.723	6.241	19.522	27.857
8	150.460	408.743	77.439	238.280	2.723	5.760	18.021	25.714
9	169.268	374.681	70.986	223.711	2.723	5.280	16.519	23.571
10	188.075	340.619	64.533	209.143	2.723	4.800	15.017	21.429
11	206.883	306.557	58.079	194.574	2.723	4.320	13.515	19.286
12	225.690	272.495	51.626	180.005	2.723	3.840	12.014	17.143
13	244.498	238.433	45.173	165.436	2.723	3.360	10.512	15.000
14	263.305	204.371	38.720	150.868	2.723	2.880	9.010	12.857
15	282.113	170.310	32.266	136.299	2.723	2.400	7.509	10.714
16	300.920	136.248	25.813	121.730	2.723	1.920	6.007	8.571
17	319.728	102.186	19.360	107.161	2.723	1.440	4.505	6.429
18	338.535	68.124	12.907	92.593	2.723	0.960	3.003	4.286
19	357.343	34.062	6.453	78.024	2.723	0.480	1.502	2.143
20	376.150	0	0	63.455	2.723	0	0	0

Dari Tabel 5.8 dan Tabel 5.9 didapatkan nilai kombinasi beban dengan faktor beban seperti pada Tabel 3.13 sebagai berikut.

Tabel 5.10 Kombinasi Beban untuk Momen Akibat Beban

Jarak	Kombinasi Pembebanan							
	x	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1754.423	1597.602	1061.830	1048.725	1081.753	1166.342	1244.753	
2	3424.985	3118.026	2069.208	2043.670	2108.032	2273.889	2427.369	
3	5011.685	4561.274	3022.133	2984.834	3078.836	3322.642	3547.848	
4	6514.524	5927.344	3920.605	3872.217	3994.165	4312.601	4606.191	
5	7933.500	7216.238	4764.624	4705.819	4854.020	5243.766	5602.397	
6	9268.615	8427.954	5554.190	5485.640	5658.401	6116.136	6536.467	
7	10519.869	9562.494	6289.304	6211.681	6407.307	6929.712	7408.400	
8	11687.260	10619.856	6969.964	6883.941	7100.738	7684.494	8218.196	
9	12770.790	11600.041	7596.172	7502.420	7738.695	8380.482	8965.856	
10	13770.459	12503.050	8167.927	8067.118	8321.178	9017.675	9651.379	
11	14686.265	13328.881	8685.229	8578.036	8848.186	9596.074	10274.766	
12	15518.210	14077.535	9148.078	9035.172	9319.719	10115.679	10836.016	
13	16266.294	14749.012	9556.474	9438.528	9735.778	10576.489	11335.130	
14	16930.515	15343.313	9910.418	9788.103	10096.362	10978.505	11772.107	
15	17510.875	15860.436	10209.908	10083.898	10401.472	11321.727	12146.947	
16	18007.373	16300.382	10454.946	10325.911	10651.107	11606.155	12459.651	
17	18420.010	16663.151	10645.531	10514.144	10845.268	11831.788	12710.218	
18	18748.785	16948.743	10781.663	10648.596	10983.955	11998.627	12898.648	
19	18993.698	17157.158	10863.343	10729.267	11067.166	12106.672	13024.942	
20	19154.750	17288.396	10890.569	10756.157	11094.904	12155.923	13089.100	

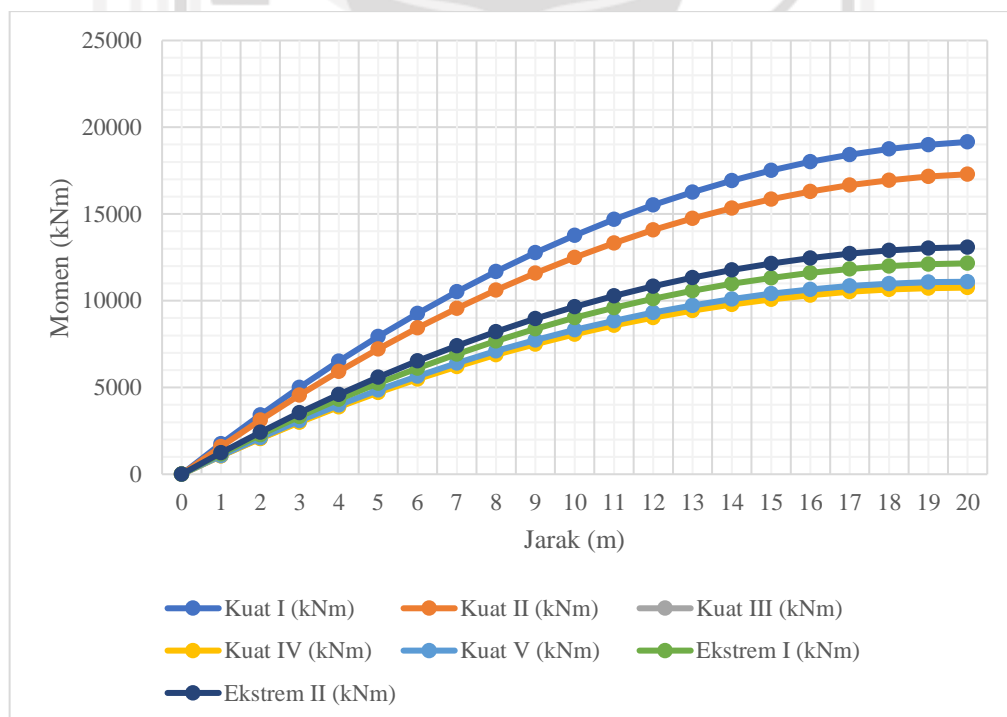
Tabel 5.11 Kombinasi Beban untuk Gaya Geser Akibat Beban

Jarak	Kombinasi Pembebanan							
	x	Kuat I	Kuat II	Kuat III	Kuat IV	Kuat V	Ekstrem I	Ekstrem II
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
0	1796.35428	1636.19016	1089.057	1075.616	1109.49	1195.73883	1275.8209	
1	1712.493	1559.013	1034.604	1021.835	1054.016	1136.945	1213.684	
2	1628.631	1481.836	980.151	968.054	998.541	1078.150	1151.548	
3	1544.769	1404.659	925.698	914.273	943.067	1019.356	1089.411	
4	1460.908	1327.482	871.246	860.493	887.592	960.562	1027.275	
5	1377.046	1250.305	816.793	806.712	832.118	901.767	965.138	
6	1293.184	1173.128	762.340	752.931	776.643	842.973	903.001	
7	1209.323	1095.951	707.887	699.150	721.169	784.179	840.865	
8	1125.461	1018.774	653.434	645.369	665.694	725.385	778.728	
9	1041.599	941.597	598.981	591.589	610.220	666.590	716.592	

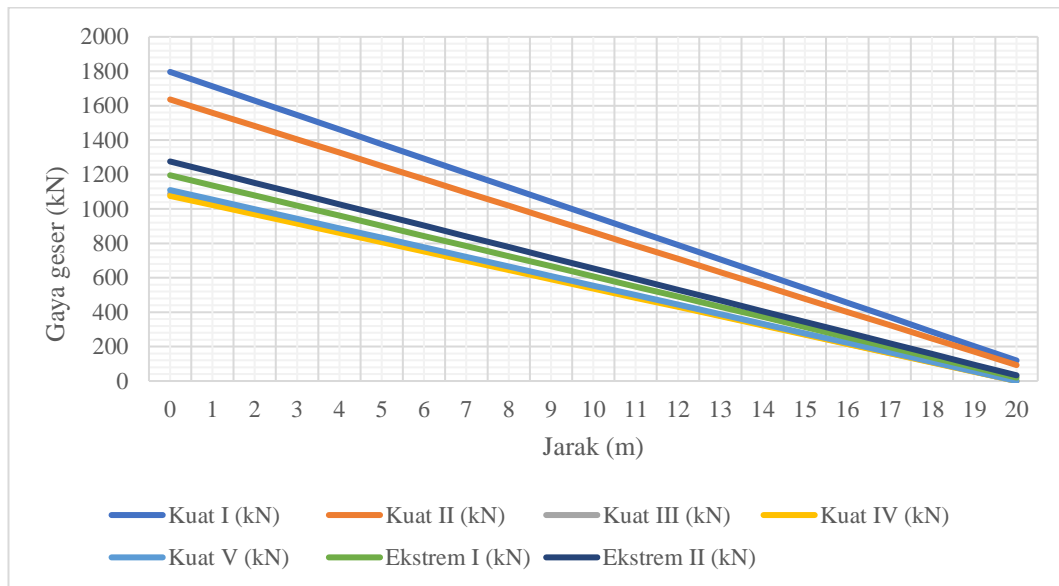
Lanjutan Tabel 5.11 Kombinasi Beban untuk Gaya Geser Akibat Beban

Jarak x (m)	Kombinasi Pembebanan						
	Kuat I (kNm)	Kuat II (kNm)	Kuat III (kNm)	Kuat IV (kNm)	Kuat V (kNm)	Ekstrem I (kNm)	Ekstrem II (kNm)
10	957.737	864.420	544.528	537.808	554.745	607.796	654.455
11	873.876	787.243	490.076	484.027	499.271	549.002	592.318
12	790.014	710.066	435.623	430.246	443.796	490.208	530.182
13	706.152	632.889	381.170	376.466	388.322	431.413	468.045
14	622.291	555.712	326.717	322.685	332.847	372.619	405.909
15	538.429	478.535	272.264	268.904	277.373	313.825	343.772
16	454.567	401.358	217.811	215.123	221.898	255.031	281.635
17	370.706	324.181	163.359	161.342	166.424	196.236	219.499
18	286.844	247.003	108.906	107.562	110.949	137.442	157.362
19	202.982	169.826	54.453	53.781	55.475	78.648	95.226
20	119.121	92.649	0.000	0.000	0.000	19.853	33.089

Dari Tabel 5.10 dan Tabel 5.11 maka dapat digambarkan diagram momen dan diagram gaya geser seperti pada Gambar



Gambar 5.16 Diagram Momen PCI-Girder H-210cm



Gambar 5.17 Diagram Gaya geser PCI-Girder H-210cm

5.2.3 Kebutuhan Tendon

1. Kondisi Awal (Saat Transfer)

Menurut RSNI T-12-2004 pasal 4.4.1.1.1 jika spesifikasi kuat tekan beton tidak disebutkan dalam spesifikasi teknik maka diartikan sebagai kuat tekan beton umur 28 hari.

Kuat tekan beton gelagar (umur 28 hari) (f'_{cg}) = 50 MPa

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

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

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

$$f'_{cig} = 0,8 \cdot 50$$

$$f'_{cig} = 40 \text{ MPa}$$

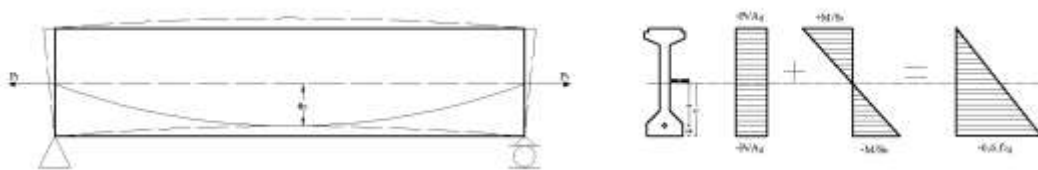
Data modulus penampang gelagar *PCI-girder* H-210cm berdasarkan subbab 5.2.1 didapat nilai seperti pada Tabel 5.12 Berikut.

Tabel 5.12 Data Modulus Penampang PCI-Girder H-210cm

Data	Kode	Nilai	Satuan
Luas penampang gelagar	A_g	0,752	m ²
Momen inersia gelagar	I_g	0,414	m ⁴
Tinggi gelagar	h_g	2,1	m
Jarak titik berat ke tepi bawah gelagar	y_b	1,012	m
Jarak titik berat ke tepi atas gelagar	y_t	1,088	m
Modulus penampang serat bawah	S_b	0,381	m ³
Modulus penampang serat atas	S_t	0,409	m ³

Jarak pusat penampang prategang ke tepi bawah penampang gelagar (y_{bs})

Lokasi pusat gaya prategang berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No. 02/M/BM/2021 diasumsikan 5-15 persen dari tinggi gelagar yang diukur dari sisi bawah gelagar. Pada perencanaan ini digunakan nilai 7%. Ilustrasi lokasi pusat gaya prategang dan eksentrisitas dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut.



Gambar 5.18 Lokasi Pusat Prategang dan Eksentrisitas serta Diagram Tegangan pada Tengah Bentang

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

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g) = 2,1 m

Sehingga,

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

$$y_{bs} = 7\% \cdot 2,1$$

$$y_{bs} = 0,147 \text{ m}$$

Eksentrisitas tendon (e_c)

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

Dimana,

Jarak titik berat ke tepi bawah gelagar (y_b) = 1,012 m

Sehingga,

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

$$e_c = 1,012 - 0,147$$

$$e_c = 0,865 \text{ m}$$

Gaya prategang (P_t)

Berdasarkan Gambar 5.18, pada saat transfer setelah selesai dilakukan penarikan, baja prategang akan berusaha kembali ke bentuk awal sehingga akan menekan beton. Karena adanya gaya tekan pada balok maka akan timbul tegangan sebesar $\frac{P}{A}$. Gaya tekan tersebut akan membuat balok melengkung ke atas sehingga pada serat atas balok akan mengalami tarik (momen bernilai positif) dan pada serat bawah akan mengalami tekan (momen bernilai negatif). Besarnya gaya prategang yang digunakan adalah nilai terkecil dari gaya prategang pada serat atas dan gaya prategang pada serat bawah. Berikut adalah perhitungan gaya prategang.

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

Berdasarkan Gambar 5.18 persamaan tegangan pada serat atas adalah sebagai berikut.

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

Dari persamaan tersebut dapat ditentukan nilai gaya prategang awal pada serat atas dengan persamaan berikut.

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

Dimana,

Berat gelagar (M_{MS_G}) = 3875,191 kNm

Luas penampang gelagar (A_g) = 0,752 m²

Modulus penampang serat atas (S_t) = 0,409 m³

Sehingga,

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

$$P_{t1} = \frac{3875,191}{0,865 - \frac{0,409}{0,752}}$$

$$P_{t1} = 12066,509 \text{ kN}$$

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

Berdasarkan Gambar 5.18 persamaan tegangan pada serat atas adalah sebagai berikut.

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

Dari persamaan tersebut dapat ditentukan nilai gaya prategang awal pada serat atas dengan persamaan berikut.

$$P_{t2} = \frac{0,6 \cdot f'_{cig} \cdot S_b + M_{MS_G}}{\frac{S_b}{A_g} + e_c}$$

Dimana,

Kuat tekan beton gelagar (saat transfer) (f'_{cig}) = 40000 kPa

Modulus penampang serat bawah (S_b) = 0,381 m³

Sehingga,

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

$$P_{t2} = \frac{0,6 \cdot 40000 \cdot 0,38 + 3875,191}{\frac{0,38}{0,752} + 0,865}$$

$$P_{t2} = 9489,112 \text{ kN}$$

Gaya prategang awal yang digunakan (P_t)

Berdasarkan perhitungan di atas, nilai gaya prategang awal yang digunakan (P_t) adalah 9489,112 kN.

2. Kondisi Akhir

Tipe *strand* yang digunakan adalah *uncoated 7 wire super strands* ASTM A-416 *grade 270* yang diproduksi oleh VSL. Berikut adalah spesifikasi baja prategang berdasarkan katalog VSL. Data baja prategang yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut.

Tabel 5.13 Data Baja Prategang Berdasarkan VSL

Data	Kode	Nilai	Satuan
Tegangan leleh <i>strand</i>	f_{py}	1675000	kPa
Kuat tarik <i>strand</i>	f_{pu}	1860000	kPa
Diameter nominal satu <i>strand</i>		0,0127	m
Luas tampang nominal satu <i>strand</i>	A_{strand}	0,0000987	m ²
Beban putus minimal satu <i>strand</i>	P_{bs}	183,7	kN
Jumlah <i>strand</i> dalam satu tendon		19	
Luas penampang <i>strand</i>		0,084	m
Beban putus satu tendon	P_{b1}	3490,3	kN
Modulus elastis <i>strand</i>	E_{ps}	195000000	kPa

Jumlah tendon yang diperlukan (n_t)

$$n_t = \frac{P_t}{0,85 \cdot 0,8 \cdot P_{b1}}$$

Dimana,

Gaya prategang awal yang digunakan (P_t) = 9489,112 kN

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

Sehingga,

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

$$n_t = \frac{9489,112}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 3490,3}$$

$$n_t = 3,998 \text{ tendon}$$

Jadi jumlah tendon yang dibutuhkan adalah $n_t = 4$ tendon.

Jumlah *strand* yang dibutuhkan (n_s)

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

Dimana,

Gaya prategang awal yang digunakan (P_t) = 9489,112 kN

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

Sehingga,

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

$$n_s = \frac{9489,112}{0,85 \cdot 0,8 \cdot 183,7}$$

$$n_s = 75,964 \text{ strands}$$

Jadi jumlah *strand* yang digunakan adalah dengan mengalikan jumlah tendon dengan jumlah *strand* dalam satu tendon.

$$n_s = 4 \cdot 19 = 76 \text{ strands}$$

Luas *strand* total yang digunakan (A_{ps})

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

$$A_{ps} = 98,7 \cdot 76$$

$$A_{ps} = 7501,2 \text{ mm}^2$$

Persentase prategang yang terjadi akibat *jacking* (p_o)

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

$$p_o = \frac{9489,112}{0,85 \cdot 76 \cdot 183,7}$$

$$p_o = 79,962 \%$$

Gaya prategang yang terjadi akibat *jacking* (P_j)

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

$$P_j = 79,962\% \cdot 76 \cdot 183,7$$

$$P_j = 11163,661 \text{ kN}$$

Kehilangan tegangan (*loss of prestress*)

Nilai kehilangan tegangan diasumsikan sebesar 26% sesuai Tabel 3.14.

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

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

$$P_{eff} = (1 - 26\%) \cdot 11163,661$$

$$P_{eff} = 8261,109 \text{ kN}$$

3. Posisi Tendon di Tengah Bentang

Posisi tendon di tengah bentang dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.



Gambar 5.19 Posisi Tendon di Tengah Bentang

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

Jumlah tendon baris ke-1 (n_1)

$$n_1 = 3 \text{ tendon}$$

$$n_1 = 3 \cdot 19 \text{ strands}$$

$$n_1 = 57 \text{ strands}$$

Jumlah tendon baris ke-2 (n_2)

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

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

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

Jarak vertikal antara as ke as tendon (y_d)

Momen statis tendon terhadap alas menghasilkan persamaan sebagai berikut.

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

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

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

Dimana,

Jumlah *strand* yang digunakan (n_s) = 76

Jarak pusat penampang prategang ke bawah penampang gelagar (y_{bs}) = 0,147 m

Sehingga,

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

$$y_d = \frac{76 \cdot (1,47 - 0,1)}{19}$$

$$y_d = 0,188 \text{ m}$$

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

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

$$y_{mid} = 0,147 \text{ m}$$

Jarak bersih vertikal antara selubung tendon

Jarak bersih vertikal antara selubung tendon disyaratkan harus lebih dari 25 mm. Nilai tersebut didapatkan dengan mengurangi jarak vertikal as ke as tendon dengan diameter selubung tendon. Dimana diameter selubung tendon (d_t) adalah 0,084 m sesuai dengan Tabel 5.13.

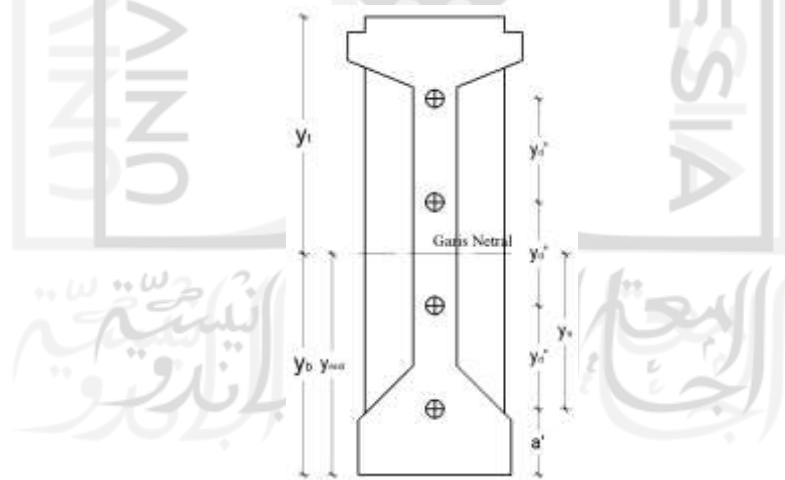
$$y_d - d_t = 0,188 - 0,084$$

$$y_d - d_t = 0,104 \text{ m}$$

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

4. Posisi Tendon di Tumpuan

Posisi tendon di tumpuan dapat dilihat pada Gambar 5.20 berikut.



Gambar 5.20 Posisi Tendon di Tumpuan

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

Jumlah tendon baris ke-1 (n_1)

$$n_1 = 1 \text{ tendon}$$

$$n_1 = 1 \cdot 19 \text{ strands}$$

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

Jumlah tendon baris ke-2 (n_2)

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

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

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

Jumlah tendon baris ke-3 (n_3)

$$n_3 = 1 \text{ tendon}$$

$$n_3 = 1 \cdot 19 \text{ strands}$$

$$n_3 = 19 \text{ strands}$$

Jumlah tendon baris ke-4 (n_4)

$$n_4 = 1 \text{ tendon}$$

$$n_4 = 1 \cdot 19 \text{ strands}$$

$$n_4 = 19 \text{ strands}$$

Momen statis tendon terhadap pusat tendon terbawah

n_i	y_d'	$n_i \cdot y_d'$
19	0	0
19	1	19
19	2	38
19	3	57
$\frac{\sum n_i \cdot y_d'}{y_d'}$		114

Letak titik berat tendon terhadap pusat tendon terbawah (y_e)

$$y_e = y_b - a'$$

Dimana,

Jarak titik berat ke bawah gelagar (y_b) = 1,012 m

Sehingga,

$$y_e = y_b - a'$$

$$y_e = 1,012 - 0,3$$

$$y_e = 0,712 \text{ m}$$

Jarak vertikal antara as ke as tendon (y_d')

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

Dimana,

Jumlah *strand* yang digunakan (n_s) = 76

Sehingga,

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

$$y_d' = \frac{0,712 \cdot 76}{114}$$

$$y_d' = 0,475 \text{ m}$$

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

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

$$y_{end} = 0,3 + 0,712$$

$$y_{end} = 1,012 \text{ m}$$

5. Eksentrisitas Masing-masing Tendon

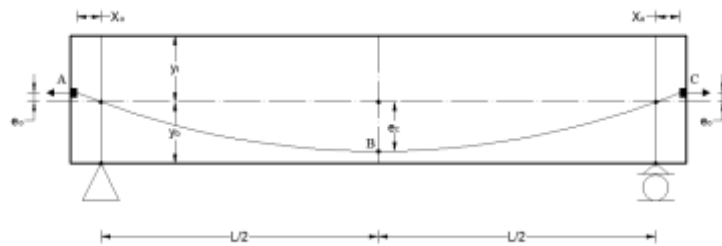
Berikut adalah perhitungan eksentrisitas masing-masing tendon yang dapat dilihat pada Tabel 5.14.

Tabel 5.14 Eksentrisitas Masing-masing Tendon

Tumpuan			Tengah Bentang			Eksentrisitas
Nomor Tendon	Posisi Tendon	z_i' (m)	Nomor Tendon	Posisi Tendon	z_i (m)	$f_i = z_i' - z_i$ (m)
1	$z_1' = a' + 3 \cdot y_d'$	$\frac{1,72}{4}$	1	$z_1 = a + y_d$	$\frac{0,28}{8}$	1,436
2	$z_2' = a' + 2 \cdot y_d'$	$\frac{1,24}{9}$	2	$z_2 = a$	0,1	1,149
3	$z_3' = a' + y_d'$	$\frac{0,77}{5}$	3	$z_3 = a$	0,1	0,675
4	$z_4' = a'$	0,3	4	$z_4 = a$	0,1	0,2

6. Lintasan Inti Tendon

Berikut adalah ilustrasi lintasan tendon yang dapat dilihat pada Gambar 5.21.



Gambar 5.21 Lintasan Tendon

Perhitungan lintasan tendon dapat dilakukan dengan persamaan berikut.

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

Dimana,

Panjang bentang (L) = 40 m

Eksentrisitas tendon (f)

$$f = e_c$$

$$f = 0,865 \text{ m}$$

Sehingga hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut.

Tabel 5.15 Hasil Perhitungan Lintasan Tendon

X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
-0.25	-0.022	11	0.690	22	0.856	33	0.500
1	0.084	12	0.727	23	0.845	34	0.441
2	0.164	13	0.759	24	0.830	35	0.378
3	0.240	14	0.787	25	0.811	36	0.311
4	0.311	15	0.811	26	0.787	37	0.240
5	0.378	16	0.830	27	0.759	38	0.164
6	0.441	17	0.845	28	0.727	39	0.084
7	0.500	18	0.856	29	0.690	40	0.000
8	0.554	19	0.863	30	0.649	0.25	0.022
9	0.603	20	0.865	31	0.603		
10	0.649	21	0.863	32	0.554		

Berdasarkan Gambar 5.21 dan Tabel 5.15 didapatkan nilai-nilai berikut.

Letak tendon (x_o)

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

Eksentrisitas tendon (e_o)

$$e_o = 0,022 \text{ m}$$

Sudut AB (α_{AB})

$$\alpha_{AB} = \frac{2 \cdot (e_s + e_o)}{\frac{L}{2} + x_o}$$

Dimana,

$$\frac{L}{2} + x_o = 20,25 \text{ m}$$

$$e_c + e_o = 0,887 \text{ m}$$

Sehingga,

$$\alpha_{AB} = \frac{2 \cdot (e_s + e_o)}{\frac{L}{2} + x_o}$$

$$\alpha_{AB} = \frac{2 \cdot 0,887}{20,25}$$

$$\alpha_{AB} = 0,088$$

Sudut BC (α_{BC})

$$\alpha_{BC} = \frac{2 \cdot (e_s + e_o)}{\frac{L}{2} + x_o}$$

$$\alpha_{BC} = \frac{2 \cdot 0,887}{20,25}$$

$$\alpha_{BC} = 0,088$$

7. Sudut Angkur

Perhitungan sudut angkur dilakukan dengan menurunkan persamaan lintasan tendon.

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

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

Karena letak angkur di tumpuan adalah $X=0$ maka $\frac{dY}{dX} = \frac{4 \cdot f}{L^2}$ sehingga persamaan sudut angkur menjadi sebagai berikut.

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

Dari persamaan di atas dihasilkan nilai seperti pada Tabel 5.16.

Tabel 5.16 Sudut Angkur

Nomor Tendon	f_i	$\frac{dY}{dX}$	α_i (rad)	α_i (derajat)
1	1,436	0,144	0,143	8,171
2	1,149	0,115	0,114	6,556
3	0,675	0,067	0,067	3,860
4	0,200	0,020	0,020	1,146

8. Tata Letak dan Trace Tendon

Posisi masing-masing tendon dapat dihitung dengan persamaan berikut.

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

Dimana,

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

$$z_0 = y_{end}$$

$$z_0 = 1,012 \text{ m}$$

Posisi tendon 1 di tumpuan (z_1') = 1,724 m

Posisi tendon 2 di tumpuan (z_2') = 1,249 m

Posisi tendon 3 di tumpuan (z_3') = 0,775 m

Posisi tendon 4 di tumpuan (z_4') = 0,3 m

Eksentrisitas tendon 1 (f_1) = 1,436 m

Eksentrisitas tendon 2 (f_2) = 1,149 m

Eksentrisitas tendon 3 (f_3) = 0,675 m

Eksentrisitas tendon 4 (f_4) = 0,2 m

Panjang bentang (L) = 40 m

Sehingga didapatkan hasil seperti pada Tabel 5.17.

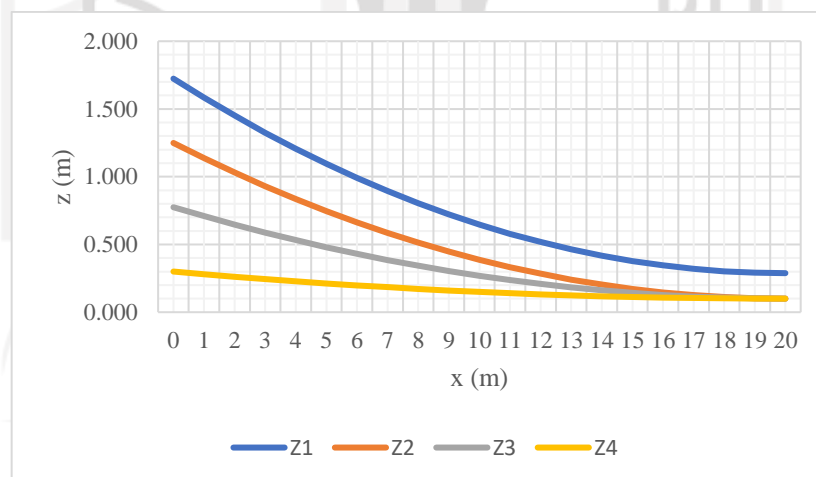
Tabel 5.17 Tata Letak Tendon

Jarak X	Trace z_0	Posisi Masing-masing Tendon			
		z_1	z_2	z_3	z_4
(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
0	1,012	1,724	1,249	0,775	0,300
1	0,928	1,584	1,137	0,709	0,281
2	0,848	1,451	1,031	0,646	0,262
3	0,772	1,325	0,930	0,587	0,245
4	0,701	1,207	0,836	0,532	0,228
5	0,634	1,096	0,746	0,479	0,213
6	0,571	0,992	0,663	0,431	0,198
7	0,512	0,895	0,586	0,385	0,185

Lanjutan Tabel 5.17 Tata Letak Tendon

Jarak x (m)	Trace z_0 (m)	Posisi Masing-masing Tendon			
		z_1 (m)	z_2 (m)	z_3 (m)	z_4 (m)
8	0,458	0,805	0,514	0,343	0,172
9	0,409	0,722	0,448	0,304	0,161
10	0,363	0,647	0,387	0,269	0,150
11	0,322	0,579	0,333	0,237	0,141
12	0,285	0,518	0,284	0,208	0,132
13	0,253	0,464	0,241	0,183	0,125
14	0,225	0,417	0,203	0,161	0,118
15	0,201	0,378	0,172	0,142	0,113
16	0,182	0,345	0,146	0,127	0,108
17	0,166	0,320	0,126	0,115	0,105
18	0,156	0,302	0,111	0,107	0,102
19	0,149	0,292	0,103	0,102	0,101
20	0,147	0,288	0,100	0,100	0,100

Tata letak tendon berdasarkan Tabel 5.17 dapat dilihat pada Gambar 5. berikut.



Gambar 5.22 Tata Letak Tendon

5.2.4 Kehilangan Prategang

5.2.4.1 Kehilangan Prategang Seketika

Kehilangan prategang seketika terdiri dari kehilangan prategang saat transfer. Kehilangan prategang saat transfer diakibatkan oleh 3 hal yaitu, gesekan, pergeseran angkur, dan perpendekan elastis. Berikut adalah perhitungan kehilangan prategang saat transfer.

1. Kehilangan Prategang saat Transfer

a. Kehilangan Prategang Akibat Gesekan (Δ_{fpF})

Perhitungan kehilangan prategang akibat gesekan dilakukan dengan persamaan berikut.

$$\alpha = \frac{2 \cdot e_p}{L_p}$$

$$P_x = P_j \cdot e^{-\sum(k \cdot x + \mu \cdot \alpha)}$$

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

Dimana :

α = penjumlahan nilai absolut perubahan sudut pada jalur baja prategang dari *jacking* hingga ujung *jacking*

e_p = jarak vertikal pusat penampang tendon rata-rata di tumpuan dengan pusat penampang tendon rata-rata di tengah bentang

L_p = panjang bentang yang ditinjau

P_x = gaya prategang setelah kehilangan akibat tegangan

P_j = gaya prategang awal

k = koefisien *wobble*

x = panjang tendon yang diukur dari ujung *jacking* ke titik yang ditinjau

μ = koefisien gesek kelengkungan

Δ_{fpF} = kehilangan gaya prategang akibat gesekan

A_{strand} = luas *strand* total

Berikut adalah perhitungan kehilangan gaya prategang akibat gesekan.

Gaya prategang awal (P_j)

$$P_j = P_t$$

Dimana,

Gaya prategang (P_t) = 9489,112 kN

Sehingga,

$$P_j = P_t$$

$$P_j = 9489,112 \text{ kN}$$

Koefisien *wobble* (k)

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

Koefisien gesek kelengkungan (μ)

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

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

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

Dimana,

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{mid}) = 147 mm

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{end}) = 1011,95 mm

Sehingga,

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

$$e_p = 1011,95 - 147$$

$$e_p = 864,95 \text{ mm}$$



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

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

Dimana,

Tegangan baja prategang sebelum transfer (f_{pbt}) = 1395 MPa

Sehingga,

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

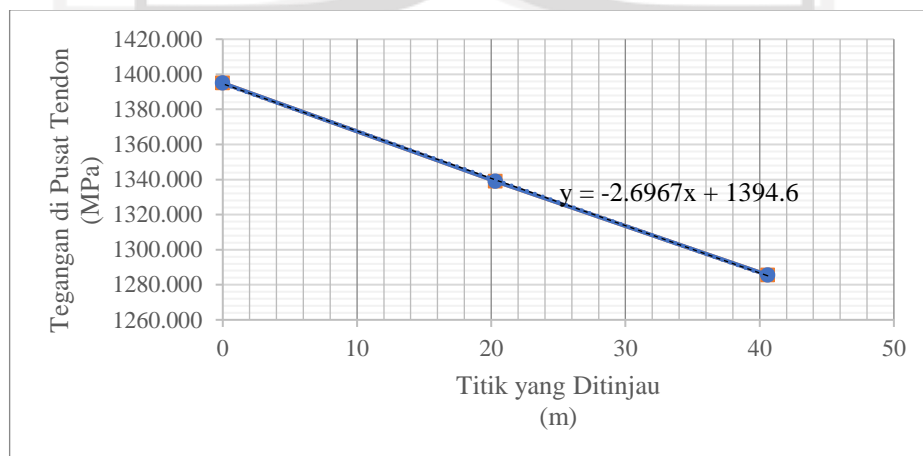
$$f_{pj} = 1395 \text{ MPa}$$

Sehingga perhitungan kehilangan prategang akibat gesekan menghasilkan nilai seperti pada Tabel 5.18.

Tabel 5.18 Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan

Segmen	e_p	L_p	α	$\sum \alpha$	$\sum L_p$	Titik	P_x	Δ_{fpF}	$f_{pj} - \Delta_{fpF}$
	(mm)	(m)	(rad)	(rad)	(m)		(kN)	(Mpa)	(Mpa)
A	0,865	0	0	0	0	A	9489,112	0	1395,000
AB	0,865	20,3	0,085	0,085	20,3	B	9069,186	55,981	1339,019
BC	0,865	20,3	0,085	0,170	40,6	C	8667,843	109,485	1285,515

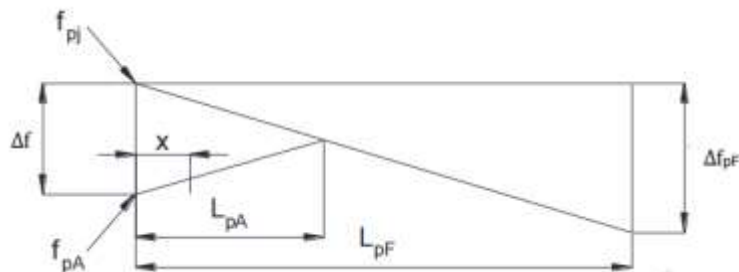
Dari Tabel 5.18 maka dihasilkan grafik kehilangan prategang di sepanjang penampang akibat gesek seperti pada Gambar 5.23 berikut.



Gambar 5.23 Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan

Jadi kehilangan prategang rata-rata akibat gesekan ($f_{pj} - \Delta_{fpF}$) di tengah bentang adalah 1339,019 MPa dan kehilangan prategang akibat gesekan Δ_{fpF} yang terjadi di tengah bentang adalah 55,981 MPa.

- b. Kehilangan Prategang Akibat *Anchorage Set* (Pergeseran Angkur) (Δ_{fpA})
 Kehilangan prategang akibat pergeseran ankur dan gesekan diilustrasikan seperti Gambar 5.24 berikut.



Gambar 5.24 Tegangan Setelah Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pergeseran Angkur dan Gesekan

Berdasarkan Gambar 5.24 semakin jauh jarak dari ankur hidup (ujung kiri) maka kehilangan prategang akibat gesekan akan semakin kecil. Pada ujung kiri akan terjadi perubahan tegangan akibat kehilangan prategang karena pergeseran ankur (Δ_f). Semakin jauh jarak dari ankur hidup maka kehilangan prategang akibat pergeseran ankur akan semakin besar hingga memotong grafik kehilangan prategang akibat gesekan dengan titik potong pada saat kehilangan prategang akibat pergeseran ankur (Δ_{fpA}) bernilai 0. Berikut adalah perhitungan kehilangan prategang akibat pergeseran ankur. Panjang gelagar yang dipengaruhi kehilangan prategang akibat pergeseran ankur (L_{pA})

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

Dimana,

Modulus elastisitas angkur (E_s) = 200000 MPa

Panjang kehilangan prategang akibat gesekan (L_{pF}) = 40600 mm

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

Berdasarkan Tabel 5.18 nilai kehilangan prategang akibat gesekan pada jarak 40,6 m dari angkur hidup sebesar 109,485 MPa.

Panjang slip tendon yang terjadi (ΔL)

Berdasarkan subbab 3.7 nilai panjang slip tendon yang terjadi diasumsikan sebesar 9,525 mm.

Sehingga,

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

$$L_{pA} = \sqrt{\frac{200000 \cdot 9,525 \cdot 40600}{109,485}}$$

$$L_{pA} = 26578,669 \text{ mm}$$

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

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

$$\Delta_f = \frac{2 \cdot 109,485 \cdot 26578,669}{40600}$$

$$\Delta_f = 143,348 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang akibat pergeseran angkur (Δ_{fpA})

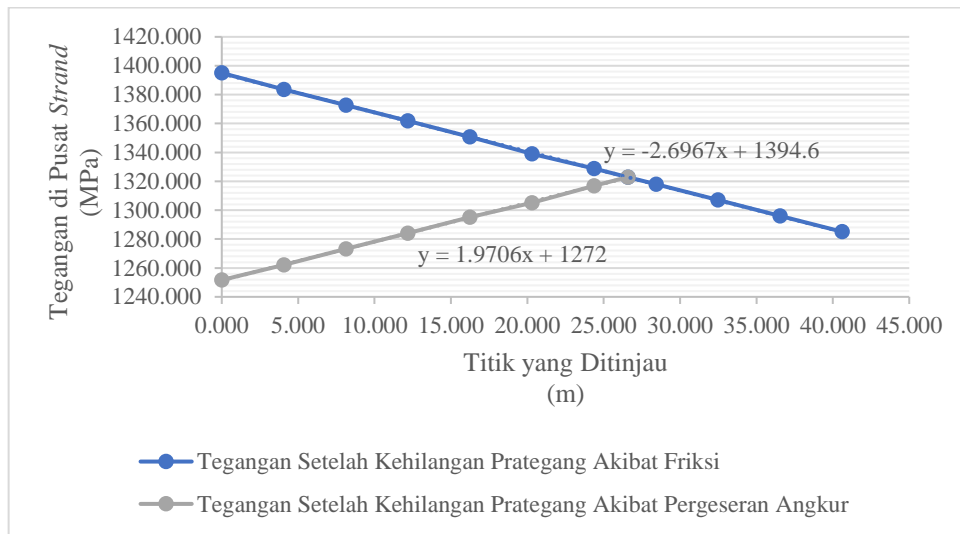
$$\Delta_{fpA} = \Delta_f \cdot \left(1 - \frac{x}{L_{pA}}\right)$$

Berdasarkan persamaan di atas nilai tegangan setelah kehilangan prategang akibat pergeseran angkur dapat dilihat pada Tabel 5.19 berikut.

Tabel 5.19 Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur

Lokasi		Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur	Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan	Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Pergeseran Angkur
		Δ_{fpA}	$f_{pj} - \Delta_{fpF}$	$(f_{pj} - \Delta_{fpF}) - \Delta_{fpA}$
$\frac{X}{L}$	X (mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
0	0	143.348	1395.000	1251.652
0.1	4060	121.451	1383.651	1262.200
0.2	8120	99.554	1372.703	1273.149
0.3	12180	77.657	1361.754	1284.097
0.4	16240	55.760	1350.806	1295.046
0.5	20300	33.863	1339.019	1305.156
0.6	24360	11.966	1328.908	1316.942
0.655	26578.669	0.000	1322.925	1322.925
0.7	28420		1317.960	
0.8	32480		1307.011	
0.9	36540		1296.063	
1	40600		1285.515	

Dari Tabel 5.19 dapat digambarkan sebagai grafik seperti pada Gambar 5.25 berikut.



Gambar 5.25 Grafik Tegangan Setelah Kehilangan Prategang Akibat Gesekan dan Pergeseran Angkur

Dari Gambar 5.25 dapat dilihat bahwa grafik kehilangan prategang akibat pergeseran angkur memotong grafik kehilangan prategang akibat gesekan pada titik sejauh 26,579 m, sehingga kehilangan prategang akibat pergeseran angkur (Δ_{fpA}) di tengah bentang adalah 33,863 MPa.

c. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Perpendekan Elastis (Δ_{fpES})

$$\text{Jumlah tendon} \quad (N_{ps}) \quad = 4$$

$$\text{Momen akibat berat sendiri gelagar} \quad (M_{MS-G}) \quad = 3875,191 \text{ kNm}$$

Tegangan pada tendon saat transfer (f_{pi1})

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

Dimana,

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

$$\text{Kehilangan gaya prategang akibat gesekan} \quad (\Delta_{fpF}) = 55,981 \text{ MPa}$$

$$\text{kehilangan gaya prategang akibat pergeseran angkur} \quad (\Delta_{fpA}) = 33,863 \text{ MPa}$$

Sehingga,

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

$$f_{pil} = 1395 - (55,981 + 33,863)$$

$$f_{pil} = 1305,156 \text{ MPa}$$

Gaya prategang awal (P_i)

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

Dimana,

$$\text{Luas total tendon } (A_{ps}) = 7501,2 \text{ mm}^2$$

Sehingga,

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

$$P_i = 1305,156 \cdot 7501,2$$

$$P_i = 9790234,504 \text{ N}$$

$$P_i = 9790,235 \text{ kN}$$

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

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

Dimana,

$$\text{Eksentrisitas rata-rata tendon di tengah bentang } (e_{mid}) = 0,865 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang gelagar } (A_g) = 0,752 \text{ m}^2$$

$$\text{Momen inersia gelagar } (I_g) = 0,414 \text{ m}^4$$

$$\text{Momen akibat berat sendiri gelagar } (M_{MS-G}) = 3875,191 \text{ kNm}$$

Sehingga,

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

$$f_{cgp} = \frac{8153,892}{0,752} + \frac{8153,892 \cdot 0,865^2}{0,414} - \frac{3875,191 \cdot 0,865}{0,414}$$

$$f_{cgp} = 30706,171 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{cgp} = 30,706 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis (Δ_{fpES})

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

Dimana,

Jumlah tendon (N_{ps}) = 4

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{cig}) = 29725,41 MPa

Sehingga,

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

$$\Delta_{fpES} = \frac{4 - 1}{2 \cdot 4} \cdot \frac{195000}{29725,41} \cdot 30,706$$

$$\Delta_{fpES} = 75,538 \text{ MPa}$$

5.2.4.2 Kehilangan Prategang Jangka Panjang

Kehilangan prategang jangka panjang terdiri dari 2 fase, yaitu kehilangan prategang saat transfer hingga pengecoran dek dan kehilangan prategang saat pengecoran dek hingga waktu akhir. Untuk perhitungan kehilangan prategang jangka panjang diperlukan data properti penampang transformasi. Data penampang transformasi tersebut antara lain:

- Properti penampang komposit
- Properti penampang nonkomposit transformasi saat transfer
- Properti penampang nonkomposit transformasi saat final (saat akhir usia layan jembatan)
- Properti penampang komposit transformasi

Berikut ini adalah perhitungan kehilangan prategang jangka panjang pada *PCI-girder* H-210cm.

1. Karakteristik Penampang Transformasi

a. Properti Penampang Komposit

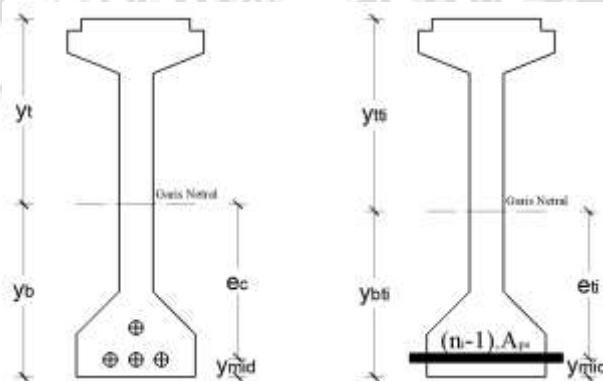
Data properti penampang komposit dihasilkan nilai seperti pada perhitungan pada subbab 5.2.1 yang dapat dilihat pada Tabel 5.20.

Tabel 5.20 Data Properti Penampang Komposit

Keterangan	Notasi	Nilai	Satuan
Tinggi total sistem dek komposit	h_{cg}	2,35	m
Luas penampang gelagar komposit	A_{cg}	1,055	m ²
Momen inersia gelagar komposit	I_{cg}	0,733	m ⁴
Jarak titik berat ke tepi bawah gelagar komposit	y_{bcg}	1,36	m
Jarak titik berat ke tepi atas gelagar komposit	y_{tcg}	0,99	m
Modulus penampang atas gelagar komposit	S_{tcg}	0,74	m ³
Modulus penampang bawah gelagar komposit	S_{bcg}	0,539	m ³

b. Properti Penampang Nonkomposit Transformasi saat Transfer

Properti penampang nonkomposit saat transfer ditentukan dengan cara mentransformasikan luas penampang tendon dengan mengalikan luas tendon dengan faktor $(n_i - 1)$, dimana n_i adalah rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{ci}). Penampang gelagar nonkomposit transformasi saat transfer ditunjukkan oleh Gambar 5.26 sebagai berikut.



Gambar 5.26 Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Transfer

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

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

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{cig}) = 29725,41 MPa

Sehingga,

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

$$n_i = \frac{195000}{29725,41}$$

$$n_i = 6,56$$

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

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

Dimana,

Luas penampang gelagar nonkomposit (A_g) = 0,752 m²

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,008 m²

Sehingga,

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

$$A_{gti} = 0,752 + (6,56 - 1) \cdot 0,008$$

$$A_{gti} = 0,794 \text{ m}^2$$

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

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

Dimana,

Luas penampang gelagar nonkomposit (A_g) = 0,752 m²

Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah (y_b) = 1,012 m

Jarak titik berat *strand* ke tepi bawah (y_{mid}) = 0,147 m

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,008 m²

Sehingga,

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

$$y_{bti} = \frac{0,752 \cdot 1,012 + (6,56 - 1) \cdot 0,008 \cdot 0,147}{0,794}$$

$$y_{bti} = 0,967 \text{ m}$$

Jarak garis netral ke tepi atas penampang gelagar nonkomposit transformasi (y_{tti})

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

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g) = 2,1 m

Sehingga,

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

$$y_{tti} = 2,1 - 0,967$$

$$y_{tti} = 1,133 \text{ m}$$

Momen inersia *strand* (I_s)

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

Dimana,

Diameter nominal satu *strand* (D_s) = 0,0127 m

Jumlah *strand* yang digunakan (n_s) = 76

Sehingga,

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

$$I_s = 76 \cdot \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot 0,0127^4$$

$$I_s = 9,71 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

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

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

Dimana,

$$\text{Luas penampang gelagar nonkomposit } (A_g) = 0,752 \text{ m}^2$$

$$\text{Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah } (y_b) = 1,012 \text{ m}$$

$$\text{Jarak titik berat } strand \text{ ke tepi bawah } (y_{mid}) = 0,147 \text{ m}$$

$$\text{Momen inersia } strand (I_s) = 9,71 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\text{Momen inersia gelagar } (I_g) = 0,414 \text{ m}^4$$

$$\text{Luas total } strand (A_{ps}) = 0,008 \text{ m}^2$$

Sehingga,

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

$$I_{ti} = 0,414 + 0,752 \cdot (0,967 - 1,012)^2 + 9,71 \cdot 10^{-8} + (6,56 - 1) \cdot 0,008 \cdot (0,967 - 0,147)^2$$

$$I_{ti} = 0,444 \text{ m}^4$$

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

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

$$S_{bti} = \frac{0,444}{0,967}$$

$$S_{bti} = 0,459 \text{ m}^3$$

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

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

$$S_{tti} = \frac{0,444}{1,133}$$

$$S_{tti} = 0,391 \text{ m}^3$$

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

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

Dimana,

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{mid}) = 0,147 m

Sehingga,

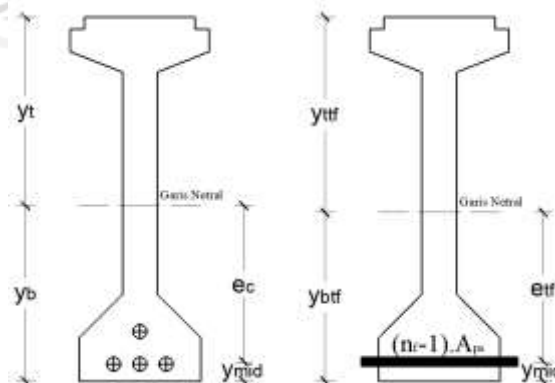
$$e_{ti} = y_{bti} - y_{mid}$$

$$e_{ti} = 0,967 - 0,147$$

$$e_{ti} = 0,82 \text{ m}$$

c. Properti Penampang Nonkomposit Transformasi saat Final

Properti penampang nonkomposit saat final ditentukan dengan cara mentransformasikan luas penampang tendon dengan mengalikan luas tendon dengan faktor ($n_f - 1$), dimana n_f adalah rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas gelagar umur 28 hari (E_c). Penampang gelagar nonkomposit transformasi saat final ditunjukkan oleh Gambar 5.27 sebagai berikut.



Gambar 5.27 Penampang Gelagar Nonkomposit Sebelum dan Setelah Transformasi saat Final

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

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

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari (E_{cg}) = 33234,019 MPa

Sehingga,

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

$$n_f = \frac{195000}{33234,019}$$

$$n_f = 5,867$$

Luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat final ($A_{g_{tf}}$)

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

Dimana,

Luas penampang gelagar nonkomposit (A_g) = 0,752 m²

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,008 m²

Sehingga,

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

$$A_{g_{tf}} = 0,752 + (5,867 - 1) \cdot 0,008$$

$$A_{g_{tf}} = 0,789 \text{ m}^2$$

Jarak garis netral ke tepi bawah penampang gelagar nonkomposit transformasi saat final ($y_{b_{tf}}$)

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

Dimana,

Luas penampang gelagar nonkomposit (A_g) = 0,752 m²

Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah (y_b) = 1,012 m

Jarak titik berat *strand* ke tepi bawah (y_{mid}) = 0,147 m

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,008 m²

Sehingga,

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

$$y_{btf} = \frac{0,752 \cdot 1,012 + (5,867 - 1) \cdot 0,008 \cdot 0,147}{0,789}$$

$$y_{btf} = 0,972 \text{ m}$$

Jarak garis netral ke tepi atas penampang gelagar non komposit transformasi saat final (y_{tff})

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

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g) = 2,1 m

Sehingga,

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

$$y_{tff} = 2,1 - 0,972$$

$$y_{tff} = 1,128 \text{ m}$$

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

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

Dimana,

Luas penampang gelagar nonkomposit (A_g) = 0,752 m²

Jarak titik berat gelagar ke tepi bawah (y_b) = 1,012 m

Jarak titik berat *strand* ke tepi bawah (y_{mid}) = 0,147 m

Momen inersia *strand* (I_s) = $9,71 \cdot 10^{-8} \text{ m}^4$

Momen inersia gelagar (I_g) = $0,414 \text{ m}^4$

Luas total *strand* (A_{ps}) = $0,008 \text{ m}^2$

Sehingga,

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

$$I_{tf} = 0,414 + 0,752 \cdot (0,972 - 1,012)^2 + 9,71 \cdot 10^{-8} + (5,867 - 1) \cdot 0,008 \cdot (0,972 - 0,147)^2$$

$$I_{tf} = 0,44 \text{ m}^4$$

Modulus penampang bawah gelagar non komposit saat final (S_{btf})

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

$$S_{btf} = \frac{0,44}{0,972}$$

$$S_{btf} = 0,453 \text{ m}^3$$

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

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

$$S_{tff} = \frac{0,44}{1,128}$$

$$S_{tff} = 0,39 \text{ m}^3$$

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

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

Dimana,

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{mid}) = 0,147 m

Sehingga,

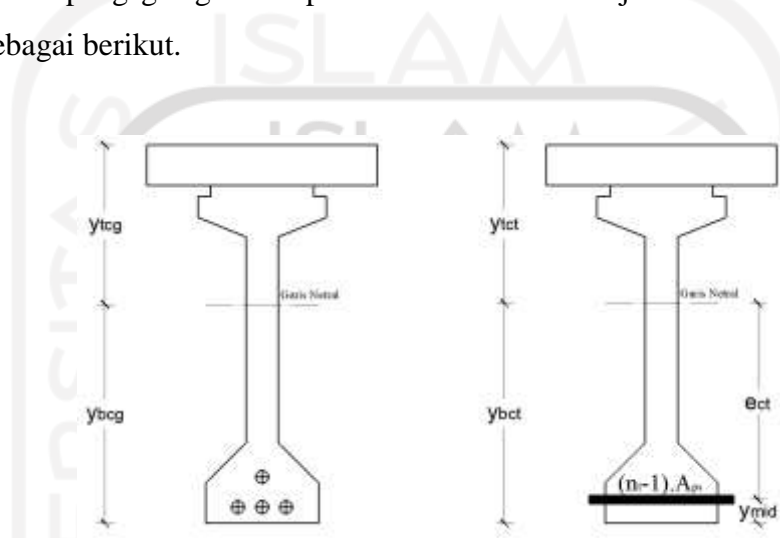
$$e_{tf} = y_{btf} - y_{mid}$$

$$e_{tf} = 0,972 - 0,147$$

$$e_{tf} = 0,825 \text{ mm}$$

d. Properti Penampang Komposit Transformasi

Penampang gelagar komposit transformasi ditunjukkan oleh Gambar 5.25 sebagai berikut.



Gambar 5.28 Penampang Gelagar Komposit Sebelum dan Setelah Transformasi

Rasio modulus elastisitas baja prategang terhadap modulus elastisitas beton gelagar komposit (n_t)

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

Dimana,

Modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari (E_{cg}) = 33234,019 MPa

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Sehingga,

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

$$n_t = \frac{195000}{33234,019}$$

$$n_t = 5,867$$

Luas penampang transformasi gelagar komposit saat final (A_{cgtf})

$$A_{cgtf} = A_{cg} + (n_t - 1) \cdot A_{ps}$$

Dimana,

Luas penampang gelagar komposit (A_{cg}) = 1,055 m²

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,008 m²

Sehingga,

$$A_{cgtf} = A_{cg} + (n_t - 1) \cdot A_{ps}$$

$$A_{cgtf} = 1,055 + (5,867 - 1) \cdot 0,008$$

$$A_{cgtf} = 1,152 \text{ m}^2$$

Jarak garis netral ke tepi bawah penampang gelagar komposit transformasi saat final (y_{bct})

$$y_{bct} = \frac{A_{cg} \cdot y_{bcg} + (n_t - 1) \cdot A_{ps} \cdot y_{mid}}{A_{cgtf}}$$

Dimana,

Jarak titik berat gelagar komposit ke tepi bawah (y_{bcg}) = 1,36 m

Jarak titik berat *strand* ke tepi bawah (y_{mid}) = 0,147 m

Luas penampang gelagar komposit (A_{cg}) = 1,055 m²

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,008 m²

Sehingga,

$$y_{bct} = \frac{A_{cg} \cdot y_{bcg} + (n_t - 1) \cdot A_{ps} \cdot y_{mid}}{A_{cgtf}}$$

$$y_{bct} = \frac{1,055 \cdot 1,36 + (5,867 - 1) \cdot 0,008 \cdot 0,147}{1,152}$$

$$y_{bct} = 1,367 \text{ m}$$

Jarak sumbu netral ke serat teratas penampang gelagar komposit transformasi saat final (y_{ict})

$$y_{ict} = h_{cg} - y_{bet}$$

Dimana,

Tinggi penampang komposit (h_{cg}) = 2,35 m

Sehingga,

$$y_{ict} = h_{cg} - y_{bet}$$

$$y_{ict} = 2,35 - 1,367$$

$$y_{ict} = 0,983 \text{ m}$$

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

$$I_{ct} = I_{cg} + A_{cg} \cdot (y_{bet} - y_{bcg})^2 + I_s + (n_t - 1) \cdot A_{ps} \cdot (y_{bet} - y_{mid})^2$$

Dimana,

Jarak titik berat gelagar komposit ke tepi bawah (y_{bcg}) = 1,36 m

Jarak titik berat *strand* ke tepi bawah (y_{mid}) = 0,147 m

Luas penampang gelagar komposit (A_{cg}) = 1,055 m²

Momen inersia gelagar komposit (I_{cg}) = 0,733 m⁴

Momen inersia *strand* (I_s) = $9,71 \cdot 10^{-8}$ m⁴

Luas total *strand* (A_{ps}) = 0,008 m²

Sehingga,

$$I_{ct} = I_{cg} + A_{cg} \cdot (y_{bet} - y_{bcg})^2 + I_s + (n_t - 1) \cdot A_{ps} \cdot (y_{bet} - y_{mid})^2$$

$$I_{ct} = 0,733 + 1,055 \cdot (1,367 - 1,36)^2 + 9,71 \cdot 10^{-8} + (5,867 - 1) \cdot 0,008 \cdot (1,367 - 0,147)^2$$

$$I_{ct} = 0,832 \text{ m}^4$$

Modulus penampang bawah gelagar komposit transformasi (S_{bet})

$$S_{bet} = \frac{I_{ct}}{y_{bet}}$$

$$S_{bct} = \frac{0,832}{1,367}$$

$$S_{bct} = 0,609 \text{ m}^3$$



Modulus penampang atas gelagar komposit transformasi (S_{ict})

$$S_{ict} = \frac{I_{ct}}{y_{ict}}$$

$$S_{ict} = \frac{0,832}{0,983}$$

$$S_{ict} = 0,846 \text{ m}^3$$

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

$$e_{ct} = y_{bct} - y_{mid}$$

Dimana,

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{mid}) = 0,147 m

Sehingga,

$$e_{ct} = y_{bct} - y_{mid}$$

$$e_{ct} = 1,367 - 0,147$$

$$e_{ct} = 1,22 \text{ m}$$

2. Kehilangan Prategang saat Transfer hingga Pengecoran Pelat

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

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

Keliling penampang gelagar tengah (K_{llg})

Berdasarkan Gambar 5.2 maka dapat dihitung keliling penampang gelagar sebagai berikut.

$$K_{llg} = 6,313 \text{ m}$$

Luas permukaan total gelagar (A_{surfg})

$$A_{surfg} = K_{llg} \cdot L_b + 2 \cdot A_g$$

Dimana,

Panjang gelagar $(L_b) = 40,6 \text{ m}$

Luas penampang gelagar $(A_g) = 0,752 \text{ m}^2$

Sehingga,

$$A_{surf_g} = K_{llg} \cdot L_b + 2 \cdot A_g$$

$$A_{surf_g} = 6,313 \cdot 40,6 + 2 \cdot 0,752$$

$$A_{surf_g} = 257,826 \text{ m}^2$$

Volume gelagar (V_g)

$$V_g = A_g \cdot L_b$$

Dimana,

Panjang gelagar $(L_b) = 40,6 \text{ m}$

Luas penampang gelagar $(A_g) = 0,752 \text{ m}^2$

Sehingga,

$$V_g = A_g \cdot L_b$$

$$V_g = 0,752 \cdot 40,6$$

$$V_g = 30,543 \text{ m}^3$$

Rasio volume terhadap luas permukaan (r_{VS})

$$r_{VS} = \frac{V_g}{A_{surf_g}}$$

$$r_{VS} = \frac{30,543}{257,826}$$

$$r_{VS} = 0,119 \text{ m}$$

$$r_{VS} = 118,465 \text{ mm}$$

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan yang ditinjau (k_s)

Nilai k_s dihitung dengan persamaan berikut.

$$k_s = 1,45 - 0,0051 \cdot r_{VS}$$

$$k_s = 1,45 - 0,0051 \cdot 118,465$$

$$k_s = 0,846$$

Dengan syarat $k_s \geq 1$. Karena nilai k_s pada perhitungan di atas kurang dari satu, maka nilai k_s yang dipakai sesuai syarat adalah 1.

Kelembaban relatif (H_r)

Berdasarkan BMKG kelembaban relatif umumnya berkisar 85%. Sehingga diasumsikan kelembaban relatif yang terjadi adalah $H_r = 85\%$.

Umur gelagar saat transfer (t_i)

Berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021 umur gelagar saat transfer diasumsikan sebagai berikut.

$$t_i = 7 \text{ hari}$$

Umur gelagar saat pengecoran pelat (t_d)

Berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021 umur gelagar saat pengecoran pelat diasumsikan sebagai berikut.

$$t_d = 120 \text{ hari}$$

Umur gelagar saat final (t_f)

Berdasarkan Sistem Manajemen Pengetahuan (SIMANTU) yang disediakan oleh Kementerian PUPR, umur rencana untuk jembatan umum adalah 50 tahun. Sehingga umur gelagar saat final adalah sebagai berikut.

$$t_f = 50 \cdot 365$$

$$t_f = 18250 \text{ hari}$$

Faktor kelembaban untuk susut (k_{hs})

$$k_{hs} = 2 - 0,014 \cdot H_r$$

$$k_{hs} = 2 - 0,014 \cdot 85\%$$

$$k_{hs} = 1,988$$

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_f)

$$k_f = \frac{35}{7 + f'_{cig}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton awal (saat transfer) (f'_{cig}) = 40 MPa

Sehingga,

$$k_f = \frac{35}{7 + f'_{cig}}$$

$$k_f = \frac{35}{7 + 40}$$

$$k_f = 0,745$$

Perpanjangan waktu antara transfer dan pengecoran pelat (t_{di})

$$t_{di} = t_d - t_i$$

$$t_{di} = 120 - 7$$

$$t_{di} = 113 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer (k_{iddi})

$$k_{iddi} = \frac{t_{di}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{di}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton awal (saat transfer) (f'_{cig}) = 40 MPa

Sehingga,

$$k_{iddi} = \frac{t_{di}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{di}}$$

$$k_{iddi} = \frac{113}{61 - 0,58 \cdot 40 + 113}$$

$$k_{iddi} = 0,749$$

Regangan susut gelagar antara waktu transfer dan pengecoran pelat (ε_{bid})

$$\varepsilon_{bid} = k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{iddi} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{bid} = 1 \cdot 1,988 \cdot 0,745 \cdot 0,749 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{bid} = 0,00053$$

Faktor kelembaban untuk rangkai (k_{hc})

$$k_{hc} = 1,56 - 0,008 \cdot H_r$$

$$k_{hc} = 1,56 - 0,008 \cdot 85\%$$

$$k_{hc} = 1,553$$

Perpanjangan waktu antara transfer dan final (t_{fi})

$$t_{fi} = t_f - t_i$$

$$t_{fi} = 18250 - 7$$

$$t_{fi} = 18243 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara final dan transfer (k_{tdfi})

$$k_{tdfi} = \frac{t_{fi}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{fi}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton awal (saat transfer) (f'_{cig}) = 40 MPa

Sehingga,

$$k_{tdfi} = \frac{t_{fi}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cig} + t_{fi}}$$

$$k_{tdfi} = \frac{18243}{61 - 0,58 \cdot 40 + 18243}$$

$$k_{tdfi} = 0,998$$

Koefisien rangkai gelagar saat waktu final karena pembebanan saat transfer

(ψ_{tfii})

$$\psi_{tfii} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{tdfi} \cdot t_i^{-0,118}$$

$$\psi_{tfii} = 1,9 \cdot 1 \cdot 1,553 \cdot 0,745 \cdot 0,998 \cdot 7^{-0,118}$$

$$\psi_{tfii} = 1,743$$

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terlekat dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara transfer dan pengecoran pelat (k_{id})

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

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{cig}) = 29725,41 MPa

Luas total tendon (A_{ps}) = 7501,2 mm²

Luas penampang gelagar (A_g) = 752300 mm²

Eksentrisitas tendon di tengah bentang (e_{mid}) = 864,95 mm

Momen inersia gelagar (I_g) = 413988026353,922 mm⁴

Sehingga,

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

$$k_{id} = \frac{1}{1 + \frac{195000}{29725,41} \cdot \frac{7501,2}{752300} \cdot \left(1 + \frac{752300 \cdot 864,95^2}{413988026353,922}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot 1,743)}$$

$$k_{id} = 0,745$$

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

$$\Delta_{fpSR} = \varepsilon_{bid} \cdot E_{ps} \cdot k_{id}$$

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Sehingga,

$$\Delta_{fpSR} = \varepsilon_{bid} \cdot E_{ps} \cdot k_{id}$$

$$\Delta_{fpSR} = 0,00053 \cdot 195000 \cdot 0,745$$

$$\Delta_{fpSR} = 77,339 \text{ MPa}$$

b. Kehilangan Prategang Akibat Relaksasi Tendon (Δ_{fpR1})

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

$$\Delta_{fpR1} = 8 \text{ MPa}$$

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

Tegangan saat setelah transfer pada strand (f_{pi2})

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

Dimana,

Tegangan baja prategang sebelum transfer (f_{pbt}) = 1395 MPa

Kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis (Δ_{fpES}) = 75,538 MPa

Kehilangan gaya prategang akibat gesekan (Δ_{fpF}) = 109,485 MPa

Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Tendon (Δ_{fpR1}) = 8 MPa

Sehingga,

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

$$f_{pi2} = 1395 - (75,538 + 109,485 + 8)$$

$$f_{pi2} = 1201,977 \text{ MPa}$$

Gaya prategang saat setelah transfer (P_i)

$$P_i = f_{pi2} \cdot A_{ps}$$

Dimana,

Luas total tendon (A_{ps}) = 7501,2 mm²

Sehingga,

$$P_i = f_{pi2} \cdot A_{ps}$$

$$P_i = 1201,977 \cdot 7501,2$$

$$P_i = 9016272,332 \text{ N}$$

$$P_i = 9016,272 \text{ kN}$$

Tegangan di beton pada level tendon saat setelah transfer (f_{cgpi})

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

Dimana,

Luas penampang transformasi gelagar nonkomposit saat transfer (A_{gti}) = 0,794 m²

Eksentrisitas tendon rata-rata pada penampang gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat transfer (e_{ti}) = 0,82 m

Momen inersia penampang gelagar transformasi saat transfer (I_{ti}) = 0,444 m⁴

Momen akibat berat sendiri gelagar (M_{MS-G}) = 3875,191 kNm

Sehingga,

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

$$f_{cgpi} = \left| \frac{-9016,272}{0,794} - \frac{9016,272 \cdot 0,82}{0,444} + \frac{3875,191 \cdot 0,82}{0,444} \right|$$

$$f_{cgpi} = 4212,166 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{cgpi} = 4,212 \text{ MPa}$$

Koefisien rangkai gelagar saat waktu transfer dan penempatan pelat karena pembebanan saat transfer (ψ_{tdti})

$$\psi_{tdti} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{tdti} \cdot t_i^{-0,118}$$

Dimana,

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan yang ditinjau (k_s) = 1

Faktor kelembaban untuk rangkai (k_{hc}) = 1,553

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_f) = 0,745

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan transfer (k_{iddi}) = 0,749

Umur gelagar saat transfer (t_i) = 7 hari

Sehingga,

$$\psi_{tdti} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{iddi} \cdot t_i^{-0,118}$$

$$\psi_{tdti} = 1,9 \cdot 1 \cdot 1,553 \cdot 0,745 \cdot 0,749 \cdot 7^{-0,118}$$

$$\psi_{tdti} = 1,309$$

Kehilangan prategang akibat rangkai pada gelagar (Δ_{fpCR})

$$\Delta_{fpCR} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgpi} \cdot \psi_{tdti} \cdot k_{id}$$

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{cig}) = 29725,41 MPa

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terlekat dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara transfer dan pengecoran pelat (k_{id}) = 0,745

Tegangan di beton pada level tendon saat setelah transfer (f_{cgpi}) = 4,212 MPa

Sehingga,

$$\Delta_{fpCR} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgpi} \cdot \psi_{tdti} \cdot k_{id}$$

$$\Delta_{fpCR} = \frac{195000}{29725,41} \cdot 4,212 \cdot 1,309 \cdot 0,745$$

$$\Delta_{fpCR} = 26,937 \text{ MPa}$$

3. Kehilangan Prategang saat Pengecoran Pelat hingga Final

Kehilangan prategang saat pengecoran pelat hingga final diakibatkan oleh susut pada gelagar, rangkai pada gelagar, dan relaksasi tendon. Pada fase ini terjadi penambahan prategang akibat penyusutan pelat. Berikut adalah perhitungan kehilangan prategang saat pengecoran pelat hingga final.

a. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Susut pada Gelagar (Δ_{fpSD})

Perpanjangan waktu antara pengecoran pelat hingga final (t_{fd})

$$t_{fd} = t_f - t_d$$

Dimana,

Umur gelagar saat final (t_f) = 18250 hari

Umur gelagar saat pengecoran pelat (t_d) = 120 hari

Sehingga,

$$t_{fd} = t_f - t_d$$

$$t_{fd} = 18250 - 120$$

$$t_{fd} = 18130 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara final dan pengecoran (k_{tfd})

$$k_{tfd} = \frac{t_{fd}}{61 - 0,58 f'_{cig} + t_{fd}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton awal (saat transfer) (f'_{cig}) = 40 MPa

Sehingga,

$$k_{tfd} = \frac{t_{fd}}{61 - 0,58 f'_{cig} + t_{fd}}$$

$$k_{tfd} = \frac{18130}{61 - 0,58 \cdot 40 + 18130}$$

$$k_{tfd} = 0,998$$

Regangan susut gelagar antara waktu final dan transfer (ϵ_{bif})

$$\epsilon_{bif} = k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{tdfd} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

Dimana,

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan yang ditinjau (k_s) = 1

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_f) = 0,745

Faktor kelembaban untuk susut (k_{hs}) = 1,988

Sehingga,

$$\epsilon_{bif} = k_s \cdot k_{hs} \cdot k_f \cdot k_{tdfd} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon_{bif} = 1 \cdot 1,988 \cdot 0,745 \cdot 0,998 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\epsilon_{bif} = 0,0007$$

Regangan susut gelagar antara waktu final dan pengecoran pelat (ϵ_{bdf})

$$\epsilon_{bdf} = \epsilon_{bif} - \epsilon_{bid}$$

Dimana,

Regangan susut gelagar antara waktu transfer dan pengecoran pelat (ϵ_{bid}) = 0,00053

Sehingga,

$$\epsilon_{bdf} = \epsilon_{bif} - \epsilon_{bid}$$

$$\epsilon_{bdf} = 0,0007 - 0,00053$$

$$\epsilon_{bdf} = 0,000177$$

Eksentrisitas tendon pada penampang komposit (e_{cg})

$$e_{cg} = y_{bcg} - y_{mid}$$

Dimana,

Jarak titik berat ke bawah gelagar komposit (y_{bcg}) = 1359,681 mm

Jarak pusat penampang tendon ke bawah gelagar (y_{mid}) = 147 mm

Sehingga,

$$e_{cg} = y_{bcg} - y_{mid}$$

$$e_{cg} = 1359,681 - 147$$

$$e_{cg} = 1212,681 \text{ mm}$$

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terlekat dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara pengecoran pelat dan final (k_{df})

$$k_{df} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot \frac{A_{ps}}{A_{cg}} \cdot \left(1 + \frac{A_{cg} \cdot e_{cg}^2}{I_{cg}}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{fti})}$$

Dimana,

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Modulus elastisitas gelagar saat transfer (E_{cig}) = 29725,41 MPa

Luas penampang komposit (A_{cg}) = 1,055 m²

Momen inersia komposit (I_{cg}) = 0,733 m⁴

Luas total tendon (A_{ps}) = 7501,2 mm²

Koefisien rangkak gelagar saat waktu final karena pembebanan saat transfer

(ψ_{fti}) = 1,734

Sehingga,

$$k_{df} = \frac{1}{1 + \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot \frac{A_{ps}}{A_{cg}} \cdot \left(1 + \frac{A_{cg} \cdot e_{cg}^2}{I_{cg}}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{fti})}$$

$$k_{df} = \frac{1}{1 + \frac{195000}{29725,41} \cdot \frac{7501,2}{1054612,996} \cdot \left(1 + \frac{1054612,996 \cdot 1212,681^2}{732893085322,039}\right) \cdot (1 + 0,7 \cdot 1,734)}$$

$$k_{df} = 0,79$$

Kehilangan prategang akibat susut pada gelagar (Δ_{fpSD})

$$\Delta_{fpSD} = \varepsilon_{bdf} \cdot E_{ps} \cdot k_{df}$$

Dimana,

Regangan susut gelagar antara waktu final dan pengecoran pelat (ε_{bdf}) = 0,000177

Modulus elastisitas baja prategang (E_{ps}) = 195000 MPa

Sehingga,

$$\Delta_{fpSD} = \varepsilon_{bdf} \cdot E_{ps} \cdot k_{df}$$

$$\Delta_{fpSD} = 0,000177 \cdot 195000 \cdot 0,79$$

$$\Delta_{fpSD} = 27,212 \text{ MPa}$$

b. Kehilangan Prategang Akibat Rangkak pada Gelagar (Δ_{fpCD})

Koefisien rangkak gelagar waktu antara pengecoran pelat dan final (ψ_{tfd})

$$\psi_{tfd} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{tfd} \cdot t_d^{-0,118}$$

Dimana,

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan yang ditinjau (k_s) = 1

Faktor kelembaban untuk rangkak (k_{hc}) = 1,553

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_f) = 0,745

Umur gelagar saat pengecoran pelat (t_d) = 120 hari

Faktor perpanjangan waktu antara final dan pengecoran (k_{tfd}) = 0,998

Sehingga,

$$\psi_{tfd} = 1,9 \cdot k_s \cdot k_{hc} \cdot k_f \cdot k_{tfd} \cdot t_d^{-0,118}$$

$$\psi_{tfd} = 1,9 \cdot 1 \cdot 1,553 \cdot 0,745 \cdot 0,998 \cdot 120^{-0,118}$$

$$\psi_{tfd} = 1,247$$

Momen yang bekerja akibat berat pelat lantai, *RC plate* dan diafragma yang bekerja pada gelagar nonkomposit transformasi final (M_s)

$$M_s = M_{MS_S} + M_{MS_{RCP}} + M_{MS_D}$$

Dimana,

Momen akibat berat pelat lantai (M_{MS_S}) = 2382,395 kNm

$$\text{Momen akibat RC plate} \quad (M_{MS_RCP}) = 436,3 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat diafragma} \quad (M_{MS_D}) = 324,397 \text{ kNm}$$

Sehingga,

$$M_S = M_{MS_S} + M_{MS_RCP} + M_{MS_D}$$

$$M_S = 2382,395 + 436,3 + 324,397$$

$$M_S = 3143,093 \text{ kNm}$$

Momen akibat beban mati tambahan (M_A)

$$M_A = M_{MA_A} + M_{MA_W} + M_{MA_br} + M_{MA_tr}$$

Dimana,

$$\text{Momen akibat aspal} \quad (M_{MA_A}) = 419,302 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat air hujan} \quad (M_{MA_W}) = 186,78 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat barrier} \quad (M_{MA_br}) = 62,586 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat trotoar} \quad (M_{MA_tr}) = 660,993 \text{ kNm}$$

Sehingga,

$$M_A = M_{MA_A} + M_{MA_W} + M_{MA_br} + M_{MA_tr}$$

$$M_A = 419,302 + 186,78 + 62,586 + 660,993$$

$$M_A = 1329,661 \text{ kNm}$$

Perubahan pada tegangan beton pada pusat penampang *strand* prategang karena kehilangan prategang jangka panjang antara transfer dan pengecoran dek, dikombinasikan dengan berat dek dan beban tambahan (Δ_{fcd})

$$\Delta_{fcd} = -(\Delta_{fpSR} + \Delta_{fpCR} + \Delta_{fpR1}) \cdot \frac{A_{ps}}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{A_g \cdot e_{mid}^2}{I_g}\right) - \left(\frac{M_S \cdot e_{ef}}{I_{ef}} + \frac{M_A \cdot e_{ct}}{I_{ct}}\right)$$

Dimana,

$$\text{Kehilangan gaya prategang akibat susut pada gelagar} \quad (\Delta_{fpSR}) = 77,339 \text{ MPa}$$

$$\text{Kehilangan gaya prategang akibat rangkai pada gelagar} \quad (\Delta_{fpCR}) = 26,937 \text{ MPa}$$

$$\text{Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Tendon} \quad (\Delta_{fpR1}) = 8 \text{ MPa}$$

Luas total tendon $(A_{ps}) = 7501,2 \text{ mm}^2$

Luas penampang gelagar $(A_g) = 752300 \text{ mm}^2$

Eksentrisitas tendon di tengah bentang $(e_{mid}) = 864,95 \text{ mm}$

Momen inersia gelagar $(I_g) = 413988026353,922 \text{ mm}^4$

Eksentrisitas tendon rata-rata pada penampang gelagar nonkomposit transformasi di tengah bentang saat final $(e_{tf}) = 0,825 \text{ m}$

Momen inersia penampang gelagar transformasi saat final $(I_{tf}) = 0,44 \text{ m}^4$

Eksentrisitas tendon rata-rata pada penampang gelagar komposit transformasi di tengah bentang saat final $(e_{ct}) = 1,22 \text{ m}$

Momen inersia penampang gelagar transformasi saat final $(I_{ct}) = 0,832 \text{ m}^4$

Sehingga,

$$\Delta_{fcd} = -\left(\Delta_{fpSR} + \Delta_{fpCR} + \Delta_{fpR1}\right) \cdot \frac{A_{ps}}{A_g} \cdot \left(1 + \frac{A_g \cdot e_{mid}^2}{I_g}\right) - \left(\frac{M_s \cdot e_{tf}}{I_{tf}} + \frac{M_A \cdot e_{ct}}{I_{ct}}\right)$$

$$\Delta_{fcd} = -2,641 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang akibat rangkak pada gelagar (Δ_{fpCD})

$$\Delta_{fpCD} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cgpi} \cdot (\psi_{tfi} - \psi_{tdi}) \cdot k_{df} + \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \cdot \Delta_{fcd} \cdot \psi_{tfd} \cdot k_{df}$$

Dimana,

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

Modulus elastisitas gelagar saat transfer $(E_{cig}) = 29725,41 \text{ MPa}$

Tegangan di beton pada level tendon saat setelah transfer $(f_{cgpi}) = 4,21 \text{ MPa}$

Koefisien rangkak gelagar saat waktu final karena pembebanan saat transfer $(\psi_{tfi}) = 1,743$

Koefisien rangkak gelagar saat waktu transfer dan penempatan pelat karena pembebanan saat transfer $(\psi_{tdi}) = 1,309$

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terlekat dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara pengecoran pelat dan final (k_{df}) = 0,79

Koefisien rangkai gelagar waktu antara pengecoran pelat dan final (ψ_{ftd}) = 1,247

Modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari (E_{cg}) = 33234,019 MPa

Sehingga,

$$\Delta_{fpCD} = \frac{E_{ps}}{E_{cig}} \cdot f_{cigpi} \cdot (\psi_{fti} - \psi_{tdi}) \cdot k_{df} + \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \cdot \Delta_{fcd} \cdot \psi_{ftd} \cdot k_{df}$$

$$\Delta_{fpCD} = -5,783$$

c. Kehilangan Prategang Akibat Relaksasi Tendon (Δ_{fpR2})

$$\Delta_{fpR2} = \Delta_{fpR1}$$

$$\Delta_{fpR2} = 8 \text{ MPa}$$

d. Tambahan Prategang Akibat Penyusutan Pelat (Δ_{fpSS})

Lebar sayap efektif (b_{ef}) = 1850 mm

Luas penampang pelat (A_d)

$$A_d = t_s \cdot b_{ef}$$

Dimana,

Tebal pelat (t_s) = 250 mm

Sehingga,

$$A_d = t_s \cdot b_{ef}$$

$$A_d = 250 \cdot 1850$$

$$A_d = 462500 \text{ mm}^2$$

Panjang perimeter penampang pelat (K_{ld})

$$K_{ld} = 2 \cdot b_{ef} + 2 \cdot t_s$$

$$K_{ld} = 2 \cdot 1850 + 2 \cdot 250$$

$$K_{lld} = 4200 \text{ mm}$$

Luas permukaan penampang pelat (A_{surfd})

$$A_{surfd} = K_{lld} \cdot L_b + 2 \cdot A_d$$

$$A_{surfd} = 4200 \cdot 40600 + 2 \cdot 462500$$

$$A_{surfd} = 171445000 \text{ mm}^2$$

$$A_{surfd} = 171,445 \text{ m}^2$$

Volume pelat (V_d)

$$V_d = A_{surfd} \cdot L_b$$

$$V_d = 171,445 \cdot 40,6$$

$$V_d = 6960,667 \text{ m}^3$$

Rasio volume terhadap luas permukaan (r_{Vsd})

$$r_{Vsd} = \frac{V_d}{A_{surfd}}$$

$$r_{Vsd} = \frac{6960,667}{171,445}$$

$$r_{Vsd} = 40,6 \text{ m}$$

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau (k_{sd})

Nilai k_{sd} dihitung dengan persamaan berikut.

$$k_{sd} = 1,45 - 0,0051 \cdot r_{Vsd}$$

$$k_{sd} = 1,45 - 0,0051 \cdot 40600$$

$$k_{sd} = -205,61$$

Dengan syarat $k_{sd} \geq 1$. Karena nilai k_{sd} pada perhitungan di atas kurang dari satu, maka nilai k_{sd} yang dipakai sesuai syarat adalah 1.

Faktor kelembaban untuk susut (k_{hsd})

$$k_{hsd} = 2 - 0,014 \cdot H_r$$

Dimana,

Kelembaban relatif (H_r) = 85%

Sehingga,

$$k_{hsd} = 2 - 0,014 \cdot H_r$$

$$k_{hsd} = 2 - 0,014 \cdot 85\%$$

$$k_{hsd} = 1,988$$

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_{fd})

$$k_{fd} = \frac{35}{7 + f'_{cid}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton saat pertama dibebani (f'_{cid}) = 30 MPa

Sehingga,

$$k_{fd} = \frac{35}{7 + f'_{cid}}$$

$$k_{fd} = \frac{35}{7 + 30}$$

$$k_{fd} = 0,946$$

Perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final (t_{dd})

$$t_{dd} = t_f - t_d$$

Dimana,

Umur gelagar saat final (t_f) = 18250 hari

Umur gelagar saat pengecoran pelat (t_d) = 120 hari

Sehingga,

$$t_{dd} = t_f - t_d$$

$$t_{dd} = 18250 - 120$$

$$t_{dd} = 18130 \text{ hari}$$

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final (k_{iddf})

$$k_{iddf} = \frac{t_{dd}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cid} + t_{dd}}$$

Dimana,

Kuat tekan beton saat pertama dibebani (f'_{cid}) = 30 MPa

Sehingga,

$$k_{iddf} = \frac{t_{dd}}{61 - 0,58 \cdot f'_{cid} + t_{dd}}$$

$$k_{iddf} = \frac{18130}{61 - 0,58 \cdot 30 + 18130}$$

$$k_{iddf} = 0,998$$

Regangan susut gelagar antara waktu pengecoran pelat dan final (ε_{ddf})

$$\varepsilon_{ddf} = k_{sd} \cdot k_{hsd} \cdot k_{fd} \cdot k_{iddf} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

Dimana,

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau (k_{sd}) = 1

Faktor kelembaban untuk susut (k_{hsd}) = 1,988

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_{fd}) = 0,946

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final (k_{iddf}) = 0,998

Sehingga,

$$\varepsilon_{ddf} = k_{sd} \cdot k_{hsd} \cdot k_{fd} \cdot k_{iddf} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ddf} = 1 \cdot 1,988 \cdot 0,946 \cdot 0,998 \cdot 0,48 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{ddf} = 0,0009$$

Koefisien rangkai pelat saat waktu final karena pembebanan saat awal pembebanan (ψ_{ftdd})

$$\psi_{ftdd} = 1,9 \cdot k_{sd} \cdot k_{hc} \cdot k_{fd} \cdot k_{iddf} \cdot t_i^{-0,118}$$

Dimana,

Faktor pengaruh rasio volume terhadap luas permukaan komponen yang ditinjau (k_{sd}) = 1

Faktor pengaruh kuat tekan beton (k_{fd}) = 0,946

Faktor perpanjangan waktu antara pengecoran pelat dan final (k_{iddf}) = 0,998

Umur gelagar saat transfer (t_i) = 7 hari

Faktor kelembaban untuk rangkai (k_{hc}) = 1,553

Sehingga,

$$\psi_{tfdd} = 1,9 \cdot k_{sd} \cdot k_{hc} \cdot k_{fd} \cdot k_{iddf} \cdot t_i^{-0,118}$$

$$\psi_{tfdd} = 1,9 \cdot 1 \cdot 1,553 \cdot 0,946 \cdot 0,998 \cdot 7^{-0,118}$$

$$\psi_{tfdd} = 2,214$$

Eksentrisitas pelat terhadap titik berat penampang komposit (e_d)

$$e_d = y_{tcg} + \frac{t_s}{2}$$

Dimana,

Jarak titik berat ke atas gelagar komposit (y_{tcg}) = 1109,681 mm

Tebal pelat (t_s) = 250 mm

Sehingga,

$$e_d = y_{tcg} + \frac{t_s}{2}$$

$$e_d = 1109,681 + \frac{250}{2}$$

$$e_d = 1234,681 \text{ mm}$$

Rangkai pada pelat beton (Δ_{fcfd})

$$\Delta_{fcfd} = \frac{\varepsilon_{ddf} \cdot A_d \cdot E_{cd}}{1 + 0,7 \cdot \psi_{tfdd}} \cdot \left(\frac{1}{A_{cg}} - \frac{e_{cg} \cdot e_d}{I_{cg}} \right)$$

Dimana,

Regangan susut gelagar antara waktu pengecoran pelat dan final (ε_{ddf}) = 0,0009

Koefisien rangkai pelat saat waktu final karena pembebanan saat awal

pembebanan (ψ_{tfdd}) = 2,214

Eksentrisitas pelat terhadap titik berat penampang komposit (e_d) = 1234,681 mm

Luas penampang pelat $(A_d) = 462500 \text{ mm}^2$
 Eksentrisitas tendon pada penampang komposit $(e_{cg}) = 1212,681 \text{ mm}$
 Luas penampang gelagar komposit $(A_{cg}) = 1,055 \text{ m}^2$
 Modulus elastis beton pelat saat umur 28 hari $(E_{cd}) = 27805,575$
 MPa
 Momen inersia gelagar komposit $(I_{cg}) = 0,733 \text{ m}^4$

Sehingga,

$$\Delta_{fcfd} = \frac{\varepsilon_{ddf} \cdot A_d \cdot E_{cd}}{1 + 0,7 \cdot \psi_{tfdd}} \cdot \left(\frac{1}{A_{cg}} - \frac{e_{cg} \cdot e_d}{I_{cg}} \right)$$

$$\Delta_{fcfd} = \frac{0,0009 \cdot 462500 \cdot 27805,575}{1 + 0,7 \cdot 2,214} \cdot \left(\frac{1}{1054612,996} - \frac{1212,681 \cdot 1234,681}{732893085322,039} \right)$$

$$\Delta_{fcfd} = -4,973 \text{ MPa}$$

Tanda (-) pada rangkai gelagar menandakan adanya gaya prategang tambahan.

Gaya prategang tambahan akibat susut di pelat (Δ_{fpSS})

$$\Delta_{fpSS} = \left| \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \cdot \Delta_{fcfd} \cdot k_{df} \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{tfdd}) \right|$$

Dimana,

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

Modulus elastisitas gelagar saat umur 28 hari $(E_{cg}) = 33234,019 \text{ MPa}$

Koefisien penampang transformasi yang memperhitungkan interaksi pengaruh waktu antara beton dan baja terlekat dalam penampang yang ditinjau untuk periode waktu antara pengecoran pelat dan final $(k_{df}) = 0,79$

Koefisien rangkai pelat saat waktu final karena pembebanan saat awal pembebanan $(\psi_{tfdd}) = 2,214$

Sehingga,

$$\Delta_{fpSS} = \left| \frac{E_{ps}}{E_{cg}} \cdot \Delta_{fcfd} \cdot k_{df} \cdot (1 + 0,7 \cdot \psi_{fidd}) \right|$$

$$\Delta_{fpSS} = \left| \frac{195000}{33234,019} \cdot (-4,973) \cdot 0,79 \cdot (1 + 0,7 \cdot 2,214) \right|$$

$$\Delta_{fpSS} = 58,765 \text{ MPa}$$

5.2.4.3 Gaya Prategang Efektif Akhir

Pada subbab sebelumnya telah dilakukan perhitungan kehilangan prategang. Berikut adalah rekapitulasi hasil perhitungan kehilangan prategang pada tengah bentang yang dapat dilihat pada Tabel 5.21 berikut.

Tabel 5.21 Rekapitulasi Kehilangan Prategang pada Tengah Bentang

Fase Kehilangan Prategang	Kehilangan Prategang	Notasi	Nilai	Satuan
Saat Transfer	Akibat gesekan	Δ_{fpF}	55,981	MPa
	Akibat pergeseran ankur	Δ_{fpA}	33,863	MPa
	Akibat perpendekan elastis	Δ_{fpES}	75,538	MPa
Saat transfer hingga pengecoran dek	Akibat susut pada gelagar	Δ_{fpSR}	77,339	MPa
	Akibat relaksasi tendon	Δ_{fpR1}	8	MPa
	Akibat rangkai pada gelagar	Δ_{fpCR}	26,937	MPa
Saat pengecoran dek hingga waktu akhir	Akibat susut pada gelagar	Δ_{fpSD}	27,212	MPa
	Akibat relaksasi tendon	Δ_{fpR2}	8	MPa
	Akibat rangkai pada gelagar	Δ_{fpCD}	-5,783	MPa
	Gaya prategang tambahan akibat susut di pelat	Δ_{fpSS}	58,765	MPa

1. Total Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan prategang seketika

$$\Delta_{fpF} + \Delta_{fpA} + \Delta_{fpES} = 55,981 + 33,863 + 75,538$$

$$\Delta_{fpA} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpES} = 165,382 \text{ MPa}$$

Kehilangan prategang jangka panjang (Δ_{fpLT})

$$\Delta_{fpLT} = \Delta_{fpSR} + \Delta_{fpCR} + \Delta_{fpR1} + \Delta_{fpSD} + \Delta_{fpR2} + \Delta_{fpCD} - \Delta_{fpSS}$$

$$\Delta_{fpLT} = 77,339 + 26,937 + 8 + 27,212 + 8 + (-5,783) - 58,765$$

$$\Delta_{fpLT} = 82,939 \text{ MPa}$$

Total kehilangan gaya prategang (Δ_{fpT})

$$\Delta_{fpT} = \Delta_{fpA} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpES} + \Delta_{fpLT}$$

$$\Delta_{fpT} = 165,382 + 82,939$$

$$\Delta_{fpT} = 248,321 \text{ MPa}$$

Persentase kehilangan prategang

$$\text{loss_of_prestress} = \left(\frac{\Delta_{fpT}}{f_{pu}} \cdot 100\% \right)$$

Dimana,

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

Sehingga,

$$\text{losses_final} = \left(\frac{\Delta_{fpT}}{f_{pu}} \cdot 100\% \right)$$

$$\text{losses_final} = \left(\frac{248,321}{1860} \cdot 100\% \right)$$

$$\text{losses_final} = 13,351\%$$

2. Gaya Prategang Efektif

Tegangan prategang efektif maksimal

Berdasarkan Panduan Bidang Jalan dan Jembatan No.02/M/BM/2021, tegangan prategang efektif maksimal dihitung dengan persamaan berikut.

$$\text{Max}f_{pe} = 0,8 \cdot f_{py}$$

Dimana,

Tegangan leleh baja prategang (f_{py}) = 1675 MPa

Sehingga,

$$Maxf_{pe} = 0,8 \cdot f_{py}$$

$$Maxf_{pe} = 0,8 \cdot 1675$$

$$Maxf_{pe} = 1340 \text{ MPa}$$

Tegangan prategang efektif aktual setelah kehilangan (f_{pe})

$$f_{pe} = (100\% - losses_{awal}) \cdot f_{pu} - \Delta_{fpT}$$

Dimana,

Kehilangan prategang awal ($losses_{awal}$) = 26%

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

Sehingga,

$$f_{pe} = (100\% - losses_{awal}) \cdot f_{pu} - \Delta_{fpT}$$

$$f_{pe} = (100\% - 26\%) \cdot 1860 - 248,321$$

$$f_{pe} = 1146,679 \text{ MPa}$$

Periksa batas maksimum prategang efektif

Syarat $f_{pe} \leq Maxf_{pe}$

Karena nilai $f_{pe} = 1146,679 < Maxf_{pe} = 1340$, maka perhitungan sudah memenuhi syarat.

3. Gaya Prategang Efektif

$$P_{ef} = A_{ps} \cdot f_{pe}$$

Dimana,

Luas total *strand* (A_{ps}) = 7501,2 mm²

Sehingga,

$$P_{ef} = A_{ps} \cdot f_{pe}$$

$$P_{ef} = 7501,2 \cdot 1146,679$$

$$P_{ef} = 8601465,966 \text{ N}$$

$$P_{ef} = 8601,466 \text{ kN}$$

5.2.5 Pemeriksaan Tegangan

Tegangan yang terjadi pada beton prategang memiliki batasan, sehingga perlu dilakukan pemeriksaan. Berikut adalah tegangan izin pada beton prategang.

1. Tegangan Izin Beton Kondisi Transfer

$$\text{Tarik} : \sigma_{t_i} = 0,25 \sqrt{f'_{cig}} = 0,25 \sqrt{40} = 1,581 \text{ MPa}$$

$$\text{Tekan} : \sigma_{c_i} = -0,6 \cdot f'_{cig} = -0,6 \cdot 40 = -24 \text{ MPa}$$

2. Tegangan Izin Beton Kondisi Layan

$$\text{Tarik} : \sigma_{t_{serv}} = 0,5 \cdot \sqrt{f'_{cg}} = 0,5 \cdot \sqrt{50} = 3,536 \text{ MPa}$$

$$\text{Tekan} : \sigma_{c_{serv}} = -0,45 \cdot f'_{cg} = -0,45 \cdot 50 = -22,5 \text{ MPa}$$

3. Tegangan izin beton kondisi layan di pelat

$$\text{Tarik} : \sigma_{t_{serv_s}} = 0,5 \cdot \sqrt{f'_{cd}} = 0,5 \cdot \sqrt{35} = 2,958 \text{ MPa}$$

$$\text{Tekan} : \sigma_{c_{serv_s}} = -0,45 \cdot f'_{cd} = -0,45 \cdot 35 = -15,75 \text{ MPa}$$

Setelah ditentukan tegangan izin, selanjutnya dilakukan pemeriksaan yang terdiri dari 3 tahap, yaitu saat transfer, saat konstruksi, dan saat layan.

1. Pemeriksaan Tegangan Penampang saat Transfer

Gaya prategang *jacking* ($P_{jacking}$)

$$P_{jacking} = 0,75 \cdot f_{pu} \cdot A_{ps}$$

Dimana,

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

Luas total *strand* (A_{ps}) = 7501,2 mm²

Sehingga,

$$P_{jacking} = 0,75 \cdot f_{pu} \cdot A_{ps}$$

$$P_{jacking} = 0,75 \cdot 1860 \cdot 7501,2$$

$$P_{jacking} = 10464174 \text{ N}$$

$$P_{jacking} = 10464,174 \text{ kN}$$

Kehilangan prategang saat transfer (Δ_{pST})

$$\Delta_{pST} = \Delta_{fpA} + \Delta_{fpF} + \Delta_{fpES}$$

$$\Delta_{pST} = 55,981 + 33,863 + 75,538$$

$$\Delta_{pST} = 165,382 \text{ MPa}$$

Gaya prategang inisial ($P_{transfer}$)

$$P_{transfer} = P_{jacking} - \Delta_{pST} \cdot A_{ps}$$

$$P_{transfer} = 10464174 - 165,382 \cdot 7501,2$$

$$P_{transfer} = 9223611,191 \text{ N}$$

$$P_{transfer} = 9223,611 \text{ kN}$$

Tegangan pada serat atas penampang (f_{t-i})

$$f_{t-i} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{MS-G}}{S_t}$$

$$f_{t-i} = \frac{-9223,611}{0,752} + \frac{9223,611 \cdot 0,865}{0,409} + \frac{-3875,191}{0,409}$$

$$f_{t-i} = -2231,743 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t-i} = -2,232 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas saat transfer

$$\text{Syarat : } |f_{t-i}| \leq |\sigma_{ci}|$$

Karena $|f_{t-i}| = 2,232 \text{ MPa} < |\sigma_{ci}| = 24 \text{ MPa}$ maka tegangan atas saat transfer memenuhi syarat.

Tegangan pada serat bawah penampang (f_{b-i})

$$f_{b-i} = \frac{-P_{transfer}}{A_g} + \frac{-P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S_b} + \frac{M_{MS-G}}{S_b}$$

$$f_{b-i} = \frac{-9223,611}{0,752} + \frac{-9223,611 \cdot 0,865}{0,381} + \frac{3875,191}{0,381}$$

$$f_{b_i} = -23043,525 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{b_i} = -23,044 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan bawah saat transfer

$$\text{Syarat : } |f_{b_i}| \leq |\sigma_{c_i}|$$

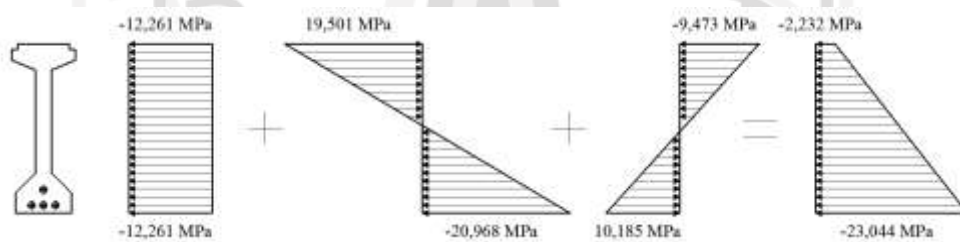
Karena $|f_{b_i}| = 23,044 \text{ MPa} < |\sigma_{c_i}| = 24 \text{ MPa}$ maka tegangan bawah saat transfer memenuhi syarat.

Hasil perhitungan di atas dapat direkapitulasi seperti pada Tabel 5.22.

Tabel 5.22 Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Transfer

Lokasi	$\frac{P_{transfer}}{A_g}$	$\frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S}$	$\frac{M_{MS_G}}{S}$	Total
	MPa	MPa	MPa	MPa
Serat atas gelagar	-12,261	19,501	-9,473	-2,232
Serat bawah gelagar	-12,261	-20,968	10,185	-23,044

Dari Tabel 5.22 dapat digambarkan menjadi diagram tegangan seperti pada Gambar 5.29.



Gambar 5.29 Diagram Tegangan Penampang saat Transfer

2. Pemeriksaan Tegangan Penampang pada Masa Konstruksi

Momen saat berat mati sendiri (M_{MS})

$$M_{MS} = M_{MS_S} + M_{MS_G} + M_{MS_ds} + M_{MS_D}$$

Dimana,

Momen akibat pelat lantai (M_{MS_S}) = 2382,395 kNm

Momen akibat diafragma (M_{MS_D}) = 324,397 kNm

Momen akibat deck slab (M_{MS_ds}) = 436,3 kNm

Momen akibat gelagar (M_{MS_G}) = 3875,191 kNm

Sehingga,

$$M_{MS} = M_{MS_S} + M_{MS_G} + M_{MS_ds} + M_{MS_D}$$

$$M_{MS} = 2382,395 + 3875,191 + 436,3 + 324,397$$

$$M_{MS} = 7018,284 \text{ kNm}$$

Tegangan pada serat atas penampang (f_{t_kons})

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

$$f_{t_kons} = \frac{-9223,611}{0,752} + \frac{9223,611 \cdot 0,865}{0,409} + \frac{7018,284}{0,409}$$

$$f_{t_kons} = -9914,705 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t_kons} = -9,915 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas saat konstruksi

$$\text{Syarat : } |f_{t_kons}| \leq |\sigma_{ci}|$$

Karena $|f_{t_kons}| = 9,915 \text{ MPa} < |\sigma_{ci}| = 24 \text{ MPa}$ maka tegangan atas saat

konstruksi memenuhi syarat.

Tegangan pada serat bawah penampang (f_{b_kons})

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

$$f_{b_kons} = \frac{-9223,611}{0,752} + \frac{-9223,611 \cdot 0,865}{0,381} + \frac{7018,284}{0,381}$$

$$f_{b_kons} = -14782,801 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{b_kons} = -14,783 \text{ MPa}$$



Periksa tegangan bawah saat konstruksi

$$\text{Syarat : } |f_{b_kons}| \leq |\sigma_{c_i}|$$

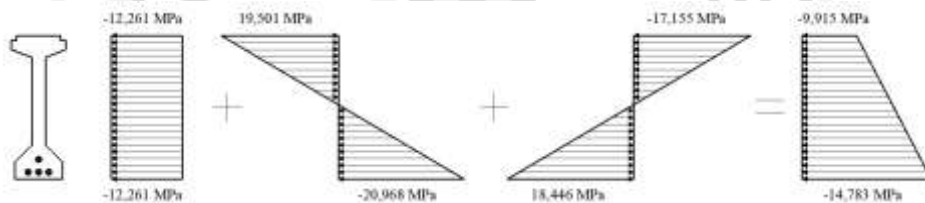
Karena $|f_{b_kons}| = 14,783 \text{ MPa} < |\sigma_{c_i}| = 24 \text{ MPa}$ maka tegangan bawah saat konstruksi memenuhi syarat.

Hasil perhitungan di atas dapat direkapitulasi seperti pada Tabel 5.23.

Tabel 5.23 Rekapitulasi Tegangan Penampang saat Konstruksi

Lokasi	$\frac{P_{transfer}}{A_g}$	$\frac{P_{transfer} \cdot e_{mid}}{S}$	$\frac{M_{MS}}{S}$	Total
	MPa	MPa	MPa	MPa
Serat atas gelagar	-12,261	19,501	-17,155	-9,915
Serat bawah gelagar	-12,261	-20,968	18,446	-14,783

Dari Tabel 5.23 dapat digambarkan menjadi diagram tegangan seperti pada Gambar 5.30.



Gambar 5.30 Diagram Tegangan Penampang saat Konstruksi

3. Pemeriksaan Tegangan Penampang Kondisi Layan

Momen akibat beban mati tambahan (M_{MA})

$$M_{MA} = M_{MA_W} + M_{MA_A} + M_{MA_br} + M_{MA_tr}$$

Dimana,

Momen akibat air hujan (M_{MA_W}) = 186,78 kNm

Momen akibat *barrier* (M_{MA_br}) = 62,586 kNm

Momen akibat trotoar (M_{MA_tr}) = 660,993 kNm

Momen akibat aspal (M_{MA_A}) = 419,302 kNm

Sehingga,

$$M_{MA} = M_{MA_W} + M_{MA_A} + M_{MA_br} + M_{MA_tr}$$

$$M_{MA} = 186,78 + 419,302 + 62,586 + 660,993$$

$$M_{MA} = 1329,661 \text{ kNm}$$

Momen akibat beban hidup (M_{LL})

$$M_{LL} = M_{TD} + M_{TP} + M_{TB}$$

Dimana,

Momen akibat pejalan kaki (M_{TP}) = 428,571 kNm

Momen akibat lajur "D" (M_{TD}) = 4182,85 kNm

Momen akibat gaya rem (M_{TB}) = 54,463 kNm

Sehingga,

$$M_{LL} = M_{TD} + M_{TP} + M_{TB}$$

$$M_{LL} = 4182,85 + 428,571 + 54,463$$

$$M_{LL} = 4665,885 \text{ kNm}$$

Tegangan pada serat atas penampang (f_{t_layan})

$$f_{t_layan} = \frac{-P_{ef}}{A_g} + \frac{P_{ef} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{-M_{MS}}{S_t} + \frac{-M_{MA} - M_{LL}}{S_{tcg}}$$

$$f_{t_layan} = \frac{-8601,466}{0,752} + \frac{8601,466 \cdot 0,865}{0,409} + \frac{-7018,284}{0,409} + \frac{-1329,661 - 4665,885}{0,74}$$

$$f_{t_layan} = -18504,566 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t_layan} = -18,505 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas saat layan

$$\text{Syarat : } |f_{t_layan}| \leq |\sigma_{c_serv}|$$

Karena $|f_{t_layan}| = 18,505 \text{ MPa} < |\sigma_{c_serv}| = 22,5 \text{ MPa}$ maka tegangan atas saat layan memenuhi syarat.

Tegangan pada serat bawah penampang (f_{b_layan})

$$f_{t_layan} = \frac{-P_{ef}}{A_g} + \frac{-P_{ef} \cdot e_{mid}}{S_t} + \frac{M_{MS}}{S_t} + \frac{M_{MA} + M_{LL}}{S_{tcg}}$$

$$f_{b_layan} = \frac{-8601,466}{0,752} + \frac{-8601,466 \cdot 0,865}{0,381} + \frac{7018,284}{0,381} + \frac{1329,661 + 4665,885}{0,539}$$

$$f_{b_layan} = -1418,426 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{b_layan} = -1,418 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan bawah saat layan

$$\text{Syarat : } |f_{b_layan}| \leq |\sigma_{serv}|$$

Karena $|f_{b_layan}| = 1,418 \text{ MPa} < |\sigma_{serv}| = 22,5 \text{ MPa}$ maka tegangan bawah saat layan memenuhi syarat.

Tegangan atas pada pelat lantai

$$f_{t_s} = \frac{-M_{MA} - M_{LL}}{S_{tcd}}$$

$$f_{t_s} = \frac{-1329,661 - 4665,885}{0,74}$$

$$f_{t_s} = -8101,462 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t_s} = -8,101 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan atas pada pelat lantai

$$\text{Syarat : } |f_{t_s}| \leq |\sigma_{serv_s}|$$

Karena $|f_{t_s}| = 8,101 \text{ MPa} < |\sigma_{serv_s}| = 15,75 \text{ MPa}$ maka tegangan atas pada pelat lantai memenuhi syarat.

Tegangan bawah pada pelat lantai

$$f_{b_s} = \frac{-M_{MA} - M_{LL}}{S_{bcd}}$$

$$f_{b_s} = \frac{-1329,661 - 4665,885}{0,99}$$

$$f_{t_s} = -4837,458 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{t_s} = -4,837 \text{ MPa}$$

Periksa tegangan bawah pada pelat lantai

$$\text{Syarat : } |f_{b_s}| \leq |\sigma_{c_{serv_s}}|$$

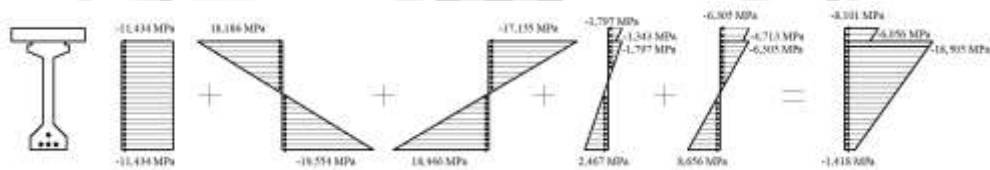
Karena $|f_{b_s}| = 4,837 \text{ MPa} < |\sigma_{c_{serv_s}}| = 15,75 \text{ MPa}$ maka tegangan bawah pada pelat lantai memenuhi syarat.

Hasil perhitungan di atas dapat direkapitulasi seperti pada Tabel 5.24.

Tabel 5.24 Tegangan Penampang saat Kondisi Layan

Lokasi	$\frac{P_{ef}}{A_{cg}}$	$\frac{P_{ef} \cdot e_{mid}}{S}$	$\frac{M_{MS}}{S}$	$\frac{M_{MA}}{S}$	$\frac{M_{LL}}{S}$	Total
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	
Serat atas gelagar	-11,434	18,186	-17,155	-1,797	-6,305	-18,505
Serat bawah gelagar	-11,434	-19,554	18,446	2,467	8,656	-1,418
Serat atas pelat				-1,797	-6,305	-8,101
Serat bawah pelat				-1,343	-4,713	-6,056

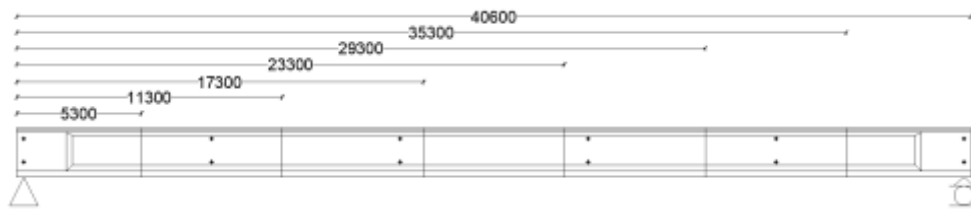
Dari Tabel 5.24 dapat digambarkan menjadi diagram tegangan seperti pada Gambar 5.30.



Gambar 5.31 Diagram Tegangan Penampang Komposit saat Layan

4. Pemeriksaan Tegangan Penampang Kondisi Layan di Sambungan

Pada jembatan beton prategang segmental tidak boleh terjadi tegangan tarik di sekitar sambungan antar gelagar. Sehingga harus dilakukan pemeriksaan tegangan. Sambungan antar gelagar terletak di titik 5,30 m, 11,30 m, 17,30 m, 23,30 m, 29,30 m, dan 35,30 m dari ujung gelagar kiri seperti pada Gambar 5.32.



Gambar 5.32 Sambungan pada Gelagar

Nilai momen yang bekerja akibat beban pada gelagar di titik-titik yang ditinjau dihitung dengan persamaan berikut.

$$M = (R_v \cdot X) - (0,5 \cdot W \cdot X^2)$$

$$R_v = 0,5 \cdot W \cdot L$$

Dengan persamaan di atas didapatkan hasil seperti pada Tabel 5.25.

Tabel 5.25 Momen yang Bekerja pada Titik Sambungan Gelagar

No	Pembebanan	Besarnya Beban (W) (kN/m)	Reaksi Vertikal (Rv) (kN)	Momen di Sambungan (kNm)					
				X = 5,3 m	X = 11,3 m	X = 17,3 m	X = 23,3 m	X = 29,3 m	X = 35,3 m
1	Pelat lantai	11,6	234,7	1081,6	1914,1	2330,4	2330,4	1914,1	1081,6
2	Deck slab	2,1	43,0	198,1	350,5	426,8	426,8	350,5	198,1
3	Gelagar	18,8	381,8	1759,3	3113,5	3790,6	3790,6	3113,5	1759,3
4	Diafragma	1,6	32,0	147,3	260,6	317,3	317,3	260,6	147,3
5	Aspal	2,0	41,3	190,4	336,9	410,1	410,1	336,9	190,4
6	Air hujan	0,9	18,4	84,8	150,1	182,7	182,7	150,1	84,8
7	Trotoar	3,2	65,1	300,1	531,1	646,6	646,6	531,1	300,1
8	Barrier	0,3	6,2	28,4	50,3	61,2	61,2	50,3	28,4
9	Angin	2,0	40,2	185,4	328,1	399,4	399,4	328,1	185,4
10	Beban merata lajur "D"	14,6	295,7	1362,8	2411,8	2936,3	2936,3	2411,8	1362,8
11	Beban titik lajur "D"	126,9	63,5	336,3	717,0	1097,8	1097,8	717,0	336,3
12	Pejalan kaki	2,1	43,5	200,5	354,7	431,9	431,9	354,7	200,5
13	Rem			108,9	108,9	108,9	108,9	108,9	108,9

Selain momen yang bekerja, perlu juga dilakukan perhitungan gaya prategang efektif dan kehilangan gaya prategang pada titik sambungan. Berikut adalah hasil perhitungan gaya prategang efektif dan kehilangan gaya prategang pada titik sambungan yang dapat dilihat pada Tabel 5.26.

Tabel 5.26 Gaya Prategang Efektif dan Kehilangan Gaya Prategang pada Sambungan

X	Δ_{fpF}	Δ_{fpA}	Δ_{fpES}	Δ_{fpLT}	Total	f_{ef}	P_{ef}
(m)	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	kN
5,3	14,693	97,863	75,538	82,939	271,033	1123,967	8431,102
11,3	30,873	69,860	75,538	82,939	259,209	1135,791	8519,793
17,3	47,053	41,856	75,538	82,939	247,386	1147,614	8608,484
23,3	63,233	13,852	75,538	82,939	235,562	1159,438	8697,175
29,3	79,413	0,000	75,538	82,939	237,890	1157,110	8679,710
35,3	95,594	0,000	75,538	82,939	254,071	1140,929	8558,339

Langkah selanjutnya dilakukan pemeriksaan tegangan pada serat atas dan serat bawah sambungan gelagar seperti pada Tabel 5.27 dan Tabel 5.28.

Tabel 5.27 Pemeriksaan Tegangan pada Serat Atas Sambungan Gelagar

X	Eksentrisitas	Momen (kNm)			Tegangan (MPa)						Cek
		M_{MS}	M_{MA}	M_{LL}	$\frac{P_{ef}}{A_g}$	$\frac{P_{ef} \cdot e}{S}$	$\frac{M_{MS}}{S}$	$\frac{M_{MA}}{S_{cg}}$	$\frac{M_{LL}}{S_{cg}}$	Total	
(m)	(mm)										
5,3	397,7	3186,3	603,7	2008,5	-11,2	8,2	-7,8	-0,8	-2,7	-14,3	OK
11,3	701,3	5638,8	1068,3	3592,5	-11,3	14,6	-13,8	-1,4	-4,9	-16,8	OK
17,3	849,2	6865,0	1300,6	4574,8	-11,4	17,9	-16,8	-1,8	-6,2	-18,3	OK
23,3	841,4	6865,0	1300,6	4574,8	-11,6	17,9	-16,8	-1,8	-6,2	-18,4	OK
29,3	677,9	5638,8	1068,3	3592,5	-11,5	14,4	-13,8	-1,4	-4,9	-17,2	OK
35,3	358,8	3186,3	603,7	2008,5	-11,4	7,5	-7,8	-0,8	-2,7	-15,2	OK

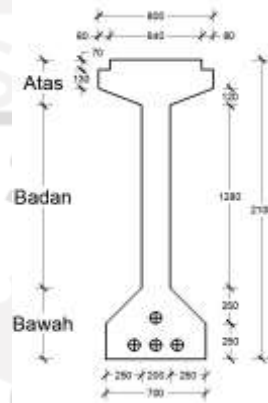
Tabel 5.28 Pemeriksaan Tegangan pada Serat Bawah Sambungan Gelagar

X	Eksentrisitas	Momen (kNm)			Tegangan (MPa)						Cek
		M_{MS}	M_{MA}	M_{LL}	$\frac{P_{ef}}{A_g}$	$\frac{P_{ef} \cdot e}{S}$	$\frac{M_{MS}}{S}$	$\frac{M_{MA}}{S_{cg}}$	$\frac{M_{LL}}{S_{cg}}$	Total	
(m)	(mm)										
5,3	397,7	3186,3	603,7	2008,5	-11,2	-8,8	8,4	1,1	3,7	-6,8	OK
11,3	701,3	5638,8	1068,3	3592,5	-11,3	-15,7	14,8	2,0	6,7	-3,6	OK
17,3	849,2	6865,0	1300,6	4574,8	-11,4	-19,2	18,0	2,4	8,5	-1,7	OK
23,3	841,4	6865,0	1300,6	4574,8	-11,6	-19,2	18,0	2,4	8,5	-1,9	OK
29,3	677,9	5638,8	1068,3	3592,5	-11,5	-15,5	14,8	2,0	6,7	-3,5	OK
35,3	358,8	3186,3	603,7	2008,5	-11,4	-8,1	8,4	1,1	3,7	-6,2	OK

Tanda (-) pada tegangan menunjukkan bahwa tidak ada gaya tarik yang bekerja di sambungan. Sehingga persyaratan batas tegangan di sambungan terpenuhi.

5.2.6 Penulangan Nonprategang Gelagar

Perhitungan penulangan nonprategang dilakukan dengan membagi gelagar menjadi tiga bagian seperti pada Gambar 5.33.



Gambar 5.33 Pembagian Gelagar untuk Perhitungan Penulangan Nonprategang

Diameter tulangan nonprategang (D) = 13 mm

Luas tulangan (A_s)

$$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2$$

$$A_s = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 0,13^2$$

$$A_s = 0,000133 \text{ m}^2$$

1. Bagian Bawah Gelagar

Luas tampang bagian bawah (A_{bawah}) = 0,286 m²

Luas tulangan bagian bawah (A_{s_bawah})

$$A_{s_bawah} = 0,5\% \cdot A_{bawah}$$

$$A_{s_bawah} = 0,5\% \cdot 0,286$$

$$A_{s_bawah} = 0,00143 \text{ m}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan (n_{bawah})

$$n_{bawah} = \frac{A_{s_bawah}}{A_s}$$

$$n_{bawah} = \frac{0,00143}{0,000133}$$

$$n_{bawah} = 10,791$$

Jumlah tulangan yang digunakan adalah 12 D 13

2. Bagian Badan Gelagar

Luas tampang bagian bawah (A_{badan}) = 0,256 m²

Luas tulangan bagian bawah (A_{s_badan})

$$A_{s_badan} = 0,5\% \cdot A_{badan}$$

$$A_{s_badan} = 0,5\% \cdot 0,256$$

$$A_{s_badan} = 0,00128 \text{ m}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan (n_{badan})

$$n_{badan} = \frac{A_{s_badan}}{A_s}$$

$$n_{badan} = \frac{0,00128}{0,000133}$$

$$n_{badan} = 9,643$$

Jumlah tulangan yang digunakan adalah 10 D 13

3. Bagian Atas Gelagar

Luas tampang bagian bawah (A_{atas}) = 0,209 m²

Luas tulangan bagian bawah (A_{s_atas})

$$A_{s_atas} = 0,5\% \cdot A_{atas}$$

$$A_{s_atas} = 0,5\% \cdot 0,209$$

$$A_{s_atas} = 0,00104 \text{ m}^2$$

Jumlah tulangan yang dibutuhkan (n_{atas})

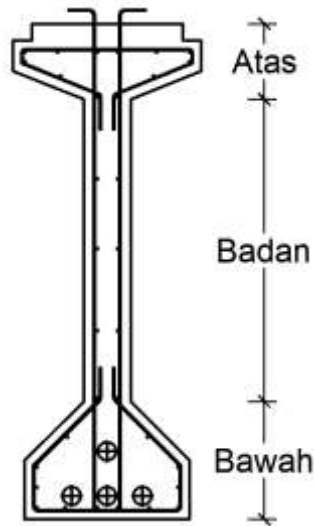
$$n_{atas} = \frac{A_{s_atas}}{A_s}$$

$$n_{badan} = \frac{0,00104}{0,000133}$$

$$n_{bawah} = 7,857$$

Jumlah tulangan yang digunakan adalah 10 D 13

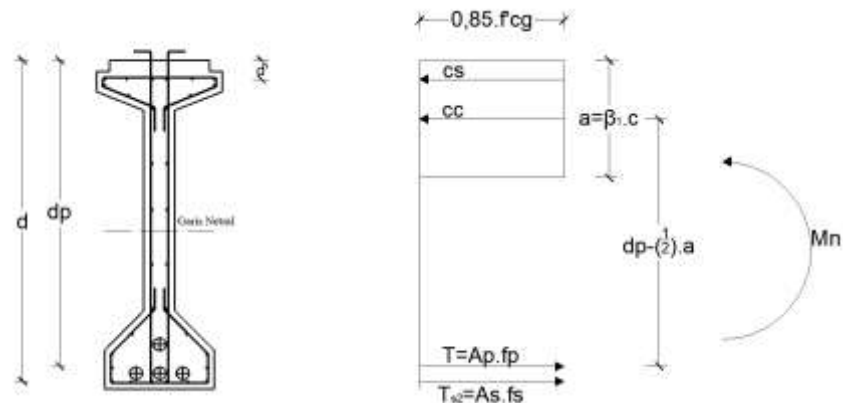
Dari perhitungan di atas dihasilkan penulangan nonprategang seperti pada Gambar 5.34 berikut.



Gambar 5.34 Detail Penulangan Nonprategang PCI-Girder H-210

5.2.7 Kapasitas Lentur Penampang

Perhitungan kapasitas lentur penampang dilakukan dengan mengacu pada diagram tegangan gelagar seperti pada Gambar 5.35 berikut.



Gambar 5.35 Diagram Tegangan Gelagar

Berikut adalah perhitungan kapasitas lentur penampang *PCI-girder* H-210.

1. Tegangan Tarik *Strand* (f_{ps})

Tegangan tarik *strand* dihitung dengan persamaan berikut.

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left[\rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_{cg}} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right] \right)$$

Dimana,

Kuat tarik *strand* (f_{pu}) = 1860 MPa

Kuat tekan beton (f'_{cg}) = 50 MPa

Tegangan leleh *strand* (f_{py}) = 1675 MPa

Nilai γ_p

$\frac{f_{py}}{f_{pu}} = 0,9$ sehingga berdasarkan SNI 2847-2013 pasal 18.7.2 nilai $\gamma_p = 0,28$

Nilai β_1

$$\beta_1 = 0,85 - \left(\frac{f'_{cg} - 28}{7} \cdot 0,05 \right)$$

$$\beta_1 = 0,85 - \left(\frac{50 - 28}{7} \cdot 0,05 \right)$$

$$\beta_1 = 0,693$$

Rasio tulangan prategang (ρ_p)

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{A_c}$$

Dimana,

$$\text{Luas strand } (A_{ps}) = 7501,2 \text{ mm}^2$$

$$\text{Luas total penampang beton } (A_c) = 752300 \text{ mm}^2$$

Sehingga,

$$\rho_p = \frac{A_{ps}}{A_c}$$

$$\rho_p = \frac{7501,2}{752300}$$

$$\rho_p = 0,00997$$

Luas tampang tulangan tarik nonprategang (A_s)

$$A_s = 6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

Dimana,

$$\text{Diameter tulangan nonprategang } (d) = 13 \text{ mm}$$

Sehingga,

$$A_s = 6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

$$A_s = 6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2$$

$$A_s = 796,394 \text{ mm}^2$$

Luas tampang tulangan tekan nonprategang (A_s')

$$A_s' = 6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

$$A_s' = 6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot d^2$$

$$A_s' = 6 \cdot \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2$$

$$A_s' = 796,394 \text{ mm}^2$$

Rasio tulangan tarik nonprategang (ρ)

$$\rho = \frac{A_s}{A_c}$$

$$\rho = \frac{796,394}{752300}$$

$$\rho = 0,00106$$

Rasio tulangan tekan nonprategang (ρ')

$$\rho' = \frac{A_s}{A_c}$$

$$\rho' = \frac{796,394}{752300}$$

$$\rho' = 0,00106$$

Nilai ω

$$\omega = \rho \cdot \frac{f_y}{f'_{cg}}$$

Dimana,

Tegangan leleh tulangan nonprategang (f_y) = 420 MPa

Sehingga,

$$\omega = \rho \cdot \frac{f_y}{f'_{cg}}$$

$$\omega = 0,00106 \cdot \frac{420}{50}$$

$$\omega = 0,00889$$

Nilai ω'

$$\omega' = \rho' \cdot \frac{f_y}{f'_{cg}}$$

$$\omega' = 0,00106 \cdot \frac{420}{50}$$

$$\omega' = 0,00889$$

Kedalaman tulangan prategang (d_p)

$$d_p = h_g - y_{mid}$$

Dimana,

Tinggi gelagar (h_g) = 2100 mm

Jarak sisi bawah gelagar ke titik berat *strand* (y_{mid}) = 147 mm

Sehingga,

$$d_p = h_g - y_{mid}$$

$$d_p = 2100 - 147$$

$$d_p = 1953 \text{ mm}$$

Kedalaman tulangan tarik nonprategang (d_s)

$$d_s = h_g - 50$$

$$d_s = 2100 - 50$$

$$d_s = 2050 \text{ mm}$$

Kedalaman rata-rata *strand* dan tulangan nonprategang (d)

$$d = \frac{A_{ps} \cdot d_p + A_s \cdot d_s}{A_{ps} + A_s}$$

$$d = \frac{7501,2 \cdot 1953 + 796,393 \cdot 2050}{7501,2 + 796,393}$$

$$d = 1962,31 \text{ mm}$$

Tegangan tarik *strand* (f_{ps})

$$f_{ps} = f_{pu} \cdot \left[1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \cdot \left[\rho_p \cdot \frac{f_{pu}}{f'_{cg}} + \frac{d}{d_p} \cdot (\omega - \omega') \right] \right]$$

$$f_{ps} = 1860 \cdot \left[1 - \frac{0,28}{0,693} \cdot \left[0,00997 \cdot \frac{1860}{50} + \frac{1962,31}{1953} \cdot (0,00889 - 0,00889) \right] \right]$$

$$f_{ps} = 1581,189 \text{ MPa}$$

Karena nilai $f_{ps} = 1581,189 \text{ MPa} < f_{py} = 1675 \text{ MPa}$ maka nilai tersebut sudah memenuhi persyaratan.

2. Gaya Tarik *Strand* (T)

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

$$T = 7501,2 \cdot 1581,189$$

$$T = 11860814,947 \text{ N}$$

3. Luas Blok Tekan (A_{cc})

$$A_{cc} = \frac{T}{0,85 \cdot f'_{cg}}$$

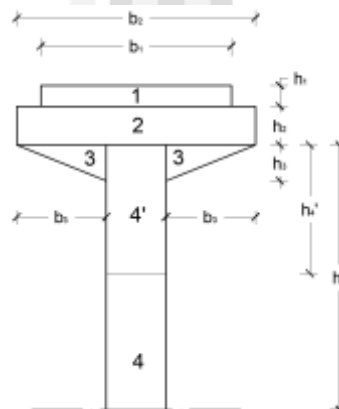
$$A_{cc} = \frac{11860814,947}{0,85 \cdot 50}$$

$$A_{cc} = 279077,999 \text{ mm}^2$$

$$A_{cc} = 0,279 \text{ m}^2$$

4. Kedalaman Blok Tekan (a)

Perhitungan kedalaman blok tekan dapat dilihat pada Gambar 5.36.



Gambar 5.36 Potongan Penampang Gelagar

Berdasarkan perhitungan pada subbab 5.2.1 dihasilkan nilai berikut.

$$\text{Luas total hingga penampang 3 (} A_3 \text{)} = 0,185 \text{ m}^2$$

$$\text{Luas total hingga penampang 4 (} A_4 \text{)} = 0,515 \text{ m}^2$$

Karena $A_3 < A_{cc} < A_4$ maka kedalaman luas blok tekan dapat dihitung sebagai berikut.

$$A_4' = A_{cc} - A_3$$

$$A_4' = 0,279 - 0,185$$

$$A_4' = 0,094 \text{ m}^2$$

$$h_4' = \frac{A_4'}{b_4}$$

$$h_4' = \frac{0,094}{0,2}$$

$$h_4' = 0,471 \text{ m}$$

Kedalaman blok tekan (a)

$$a = h_1 + h_2 + h_4'$$

$$a = 0,7 + 0,13 + 0,471$$

$$a = 0,671 \text{ m}$$

5. Titik berat blok tekan (y_{cc})

Perhitungan data penampang blok tekan dapat dilihat pada Tabel 5.29 berikut.

Tabel 5.29 Rekapitulasi Penampang Blok tekan

No	Dimensi		Luas Tampang	Jarak Titik Berat Tampang Terhadap Tepi Atas	Statis Momen
	Lebar	Tinggi			
	b_i (m)	h_i (m)			
			A_i (m ²)	y_i (m)	$A_i \cdot y_i$ (m ³)
1	0,64	0,07	0,045	0,035	0,002
2	0,8	0,13	0,104	0,135	0,014
3	0,3	0,12	0,036	0,24	0,009
4'	0,2	0,471	0,094	0,436	0,041
TOTAL			0,279		0,065

Titik berat blok tekan (y_{cc})

$$y_{cc} = \frac{\sum A_i \cdot y_i}{\sum A_i}$$

$$y_{cc} = \frac{0,065}{0,279}$$

$$y_{cc} = 0,234 \text{ m}$$

6. Kapasitas Lentur Penampang (M_n)

$$M_n = A_{cc} \cdot 0,85 \cdot f'_{cg} \cdot (d_p - y_{cc})$$

$$M_n = 0,279 \cdot 0,85 \cdot 50000 \cdot (1,953 - 0,234)$$

$$M_n = 20387,882 \text{ kNm}$$

5.2.8 Kapasitas Geser Penampang

Kapasitas geser penampang dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_c = \left(0,05 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_{cg}} + 4,8 \cdot \frac{V_u \cdot d_p}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d$$

Berikut adalah langkah perhitungannya.

1. Momen ultimit (M_u)

$$M_u = 1,2 \cdot M_{MS} + 2 \cdot M_{MA} + 1,8 \cdot M_{LL}$$

Dimana,

$$\text{Momen akibat berat sendiri } (M_{MS}) = 7018,284 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban mati tambahan } (M_{MA}) = 1329,661 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen akibat beban hidup } (M_{LL}) = 4665,885 \text{ kNm}$$

Sehingga,

$$M_u = 1,2 \cdot M_{MS} + 2 \cdot M_{MA} + 1,8 \cdot M_{LL}$$

$$M_u = 1,2 \cdot 7018,284 + 2 \cdot 1329,661 + 1,8 \cdot 4665,885$$

$$M_u = 19479,855 \text{ kNm}$$

2. Beban ultimit (W_u)

$$W_u = \frac{M_u \cdot 8}{L^2}$$

$$W_u = \frac{19479,855 \cdot 8}{40^2}$$

$$W_u = 97,399 \text{ kN/m}$$

3. Gaya geser ultimit (V_u)

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot W_u \cdot L$$

$$V_u = \frac{1}{2} \cdot 97,399 \cdot 40$$

$$V_u = 1947,985$$

4. Kapasitas geser penampang (V_c)

$$V_c = \left(0,05 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_{cg}} + 4,8 \cdot \frac{V_u \cdot d_p}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d$$

Dimana,

Lebar penampang (b_w) = 0,7 m

Kedalaman tulangan prategang (d_p) = 1,953 m

Kedalaman rata-rata *strand* dan tulangan nonprategang (d) = 1,962 m

Kuat tekan beton (f'_{cg}) = 50 MPa

Sehingga,

$$V_c = \left(0,05 \cdot \lambda \cdot \sqrt{f'_{cg}} + 4,8 \cdot \frac{V_u \cdot d_p}{M_u} \right) \cdot b_w \cdot d$$

$$V_c = \left(0,05 \cdot 1 \cdot \sqrt{50000} + 4,8 \cdot \frac{1947,985 \cdot 1,953}{19479,855} \right) \cdot 0,7 \cdot 1,962$$

$$V_c = 1773,33 \text{ kN}$$

5.3 Rekapitulasi Perhitungan *PCI-Girder H-210* dan *PCI-Girder H-170*

PCI-girder H-170 dilakukan perhitungan dengan langkah yang sama seperti perhitungan PCI-girder H-210 sehingga menghasilkan data seperti sebagai berikut.

1. Rekapitulasi Perhitungan Modulus Penampang

Dari perhitungan modulus penampang dihasilkan data seperti pada Tabel 5.30 berikut.

Tabel 5.30 Rekapitulasi Perhitungan Modulus Penampang *PCI-Girder H-210* dan *PCI-Girder H-170*

Data Modulus Penampang	Notasi	<i>PCI-Girder H-210</i>	<i>PCI-Girder H-170</i>	Satuan
Gelagar Nonkomposit				
Letak titik berat gelagar terhadap alas	y_b	1,012	0,82	m
Letak titik berat gelagar terhadap tepi atas	y_t	1,088	0,88	m
Momen inersia	I_g	0,414	0,238	m ⁴
Tahanan momen serat atas gelagar	S_t	0,38	0,271	m ³
Tahanan momen serat bawah gelagar	S_b	0,409	0,291	m ³
Gelagar Komposit				
Letak titik berat gelagar terhadap alas	y_{bcg}	1,36	1,129	m
Letak titik berat gelagar terhadap tepi atas	y_{tcg}	0,99	0,821	m
Momen inersia	I_{cg}	0,733	0,449	m ⁴
Tahanan momen serat atas gelagar	S_{tcg}	0,74	0,546	m ³
Tahanan momen serat bawah gelagar	S_{bcg}	0,539	0,397	m ³

2. Rekapitulasi Perhitungan Pembebanan Gelagar

Berikut adalah rekapitulasi perhitungan pembebanan gelagar yang dapat dilihat pada Tabel 5.31 dan Tabel 5.32.

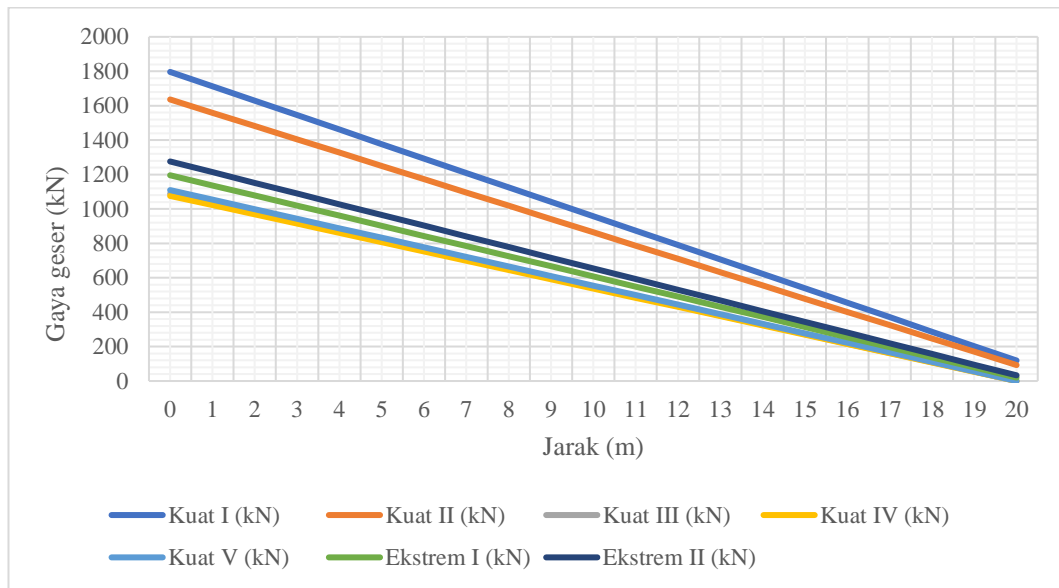
Tabel 5.31 Rekapitulasi Perhitungan Gaya Geser *PCI-Girder H-210* dan *PCI-Girder H-170*

Jenis Pembebanan	Notasi	<i>PCI-Girder H-210</i>	<i>PCI-Girder H-170</i>	Satuan
Berat sendiri	<i>MS</i>	691,457	647,674	kN
Beban mati tambahan	<i>MA</i>	131,001	115,159	kN
Beban lajur "D"	<i>TD</i>	354,83	268,52	kN
Gaya rem	<i>TP</i>	2,723	1,829	kN
Beban angin struktur	<i>EW_s</i>	9,601	7,082	kN
Beban angin kendaraan	<i>EW_L</i>	30,034	30,034	kN
Pejalan kaki	<i>TP</i>	42,857	33,333	kN

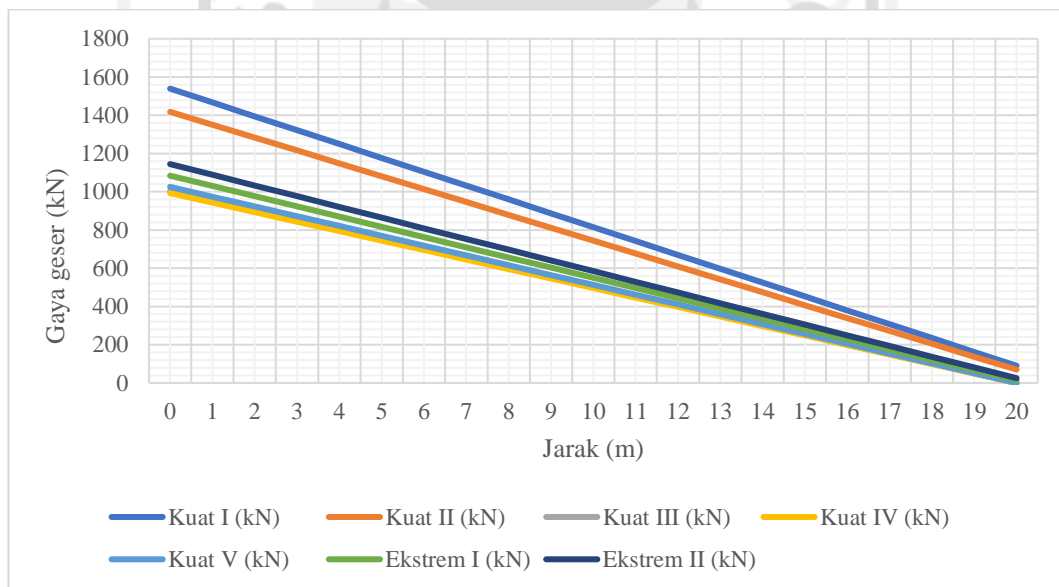
Tabel 5.32 Rekapitulasi Perhitungan Momen Maksimum *PCI-Girder H-210* dan *PCI-Girder H-170*

Jenis Pembebanan	Notasi	<i>PCI-Girder H-210</i>	<i>PCI-Girder H-170</i>	Satuan
Berat sendiri	<i>MS</i>	7018,284	6573,891	kNm
Beban mati tambahan	<i>MA</i>	1329,661	1168,865	kNm
Beban lajur "D"	<i>TD</i>	4182,85	3165,4	kNm
Gaya rem	<i>TP</i>	54,463	36,586	kNm
Beban angin struktur	<i>EW_s</i>	96,008	70,822	kNm
Beban angin kendaraan	<i>EW_L</i>	300,343	300,343	kNm
Pejalan kaki	<i>TP</i>	428,571	333,333	kNm

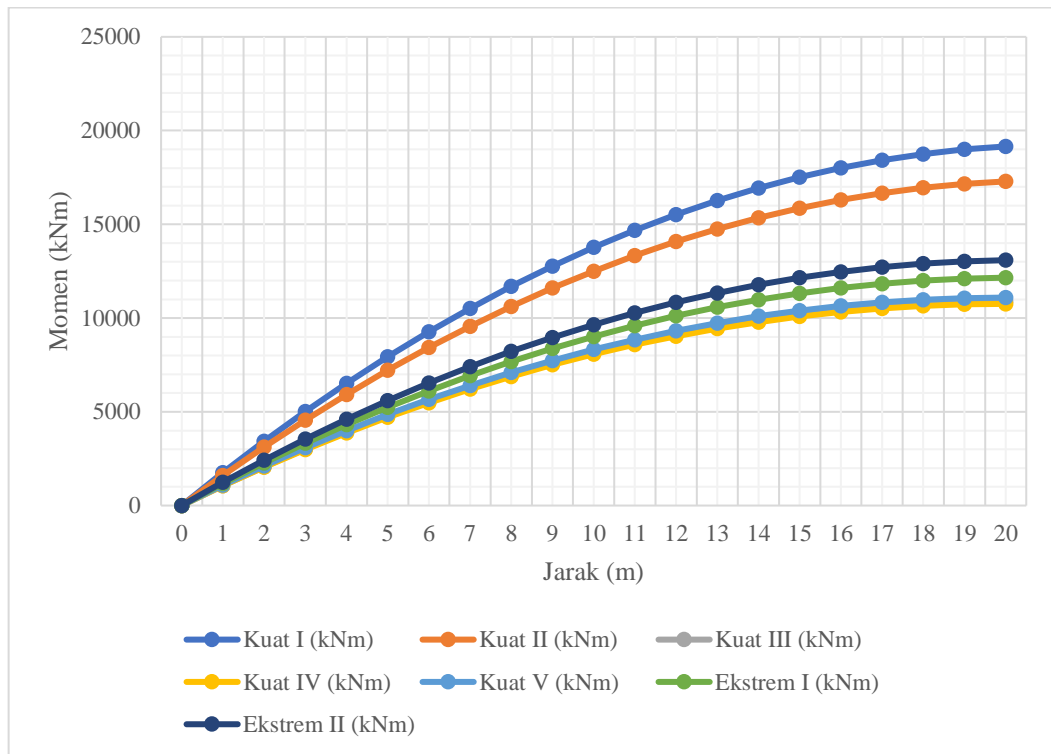
Dari Tabel 5.31 dan Tabel 5.32 dihasilkan diagram gaya geser dan diagram momen sebagai berikut.



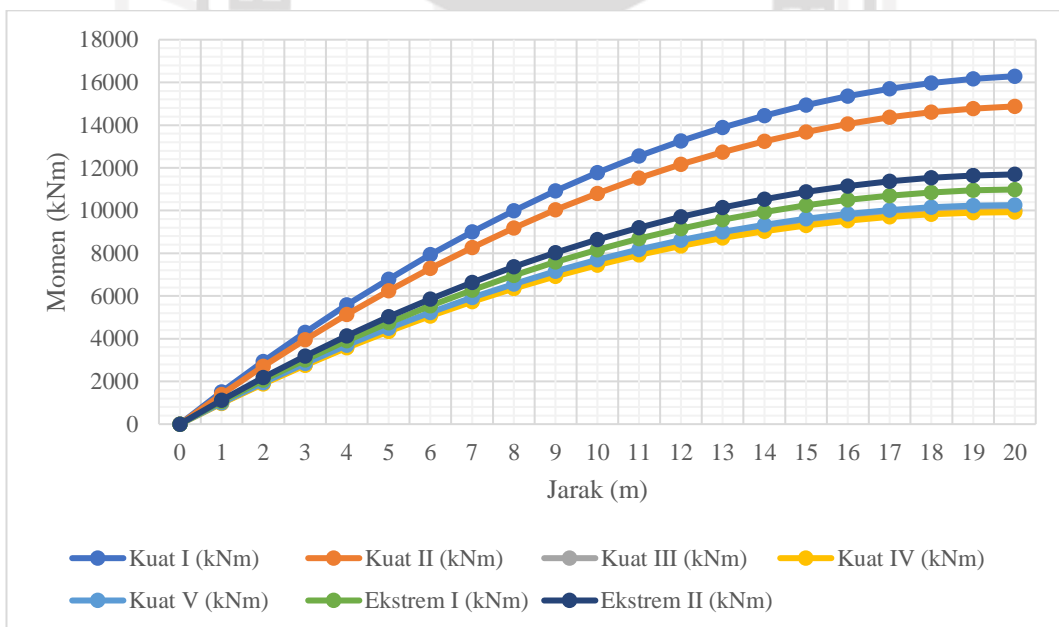
Gambar 5.37 Diagram Gaya Geser PCI-Girder H-210



Gambar 5.38 Diagram Gaya Geser PCI-Girder H-170



Gambar 5.39 Diagram Momen PCI-Girder H-210



Gambar 5.40 Diagram Momen PCI-Girder H-170

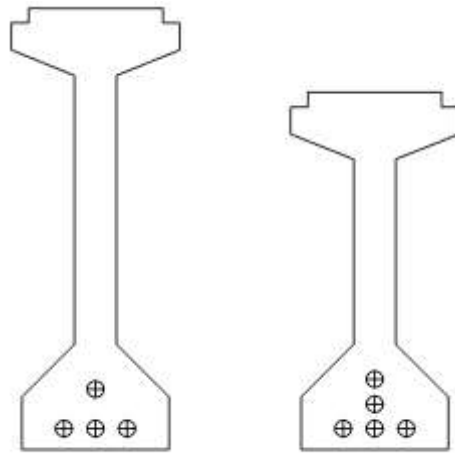
3. Rekapitulasi Perhitungan Kebutuhan Tendon

Data yang digunakan pada *PCI-girder* H-210 dan *PCI-girder* H-170 dapat dilihat pada Tabel 5.33 berikut.

Tabel 5.33 Data Perhitungan Kebutuhan Tendon *PCI-Girder* H-210 dan *PCI-Girder* H-170

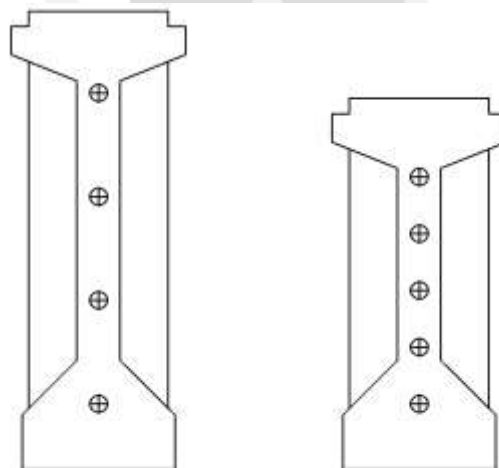
Data Perhitungan	Notasi	<i>PCI-Girder</i> H-210	<i>PCI-Girder</i> H-170	Satuan
Kuat tekan gelagar	f'_{cg}	50000	60000	kPa
Tipe strand		<i>Uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270</i>	<i>Uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270</i>	
Tegangan leleh strand	f_{py}	1675000	1675000	kPa
Kuat tarik strand	f_{pu}	1860000	1860000	kPa
Diameter nominal satu strand		0,0127	0,0127	m
Luas tampang nominal satu strand	A_{strand}	0,0000987	0,0000987	m ²
Beban putus minimal satu strand	P_{bs}	183,7	183,7	kN
Jumlah strand dalam satu tendon		19	19	
Luas penampang strand		0,084	0,084	m
Beban putus satu tendon	P_{bt}	3490,3	3490,3	kN
Modulus elastis strand	E_{ps}	195000000	195000000	kPa

Dari data pada Tabel 5.33 dihasilkan jumlah tendon yang dibutuhkan oleh *PCI-girder* H-210 adalah sebanyak 4 tendon dengan 76 strand, sedangkan *PCI-girder* H-170 dibutuhkan sebanyak 5 tendon dengan 95 strand. Berikut adalah detail gambar masing-masing gelagar.



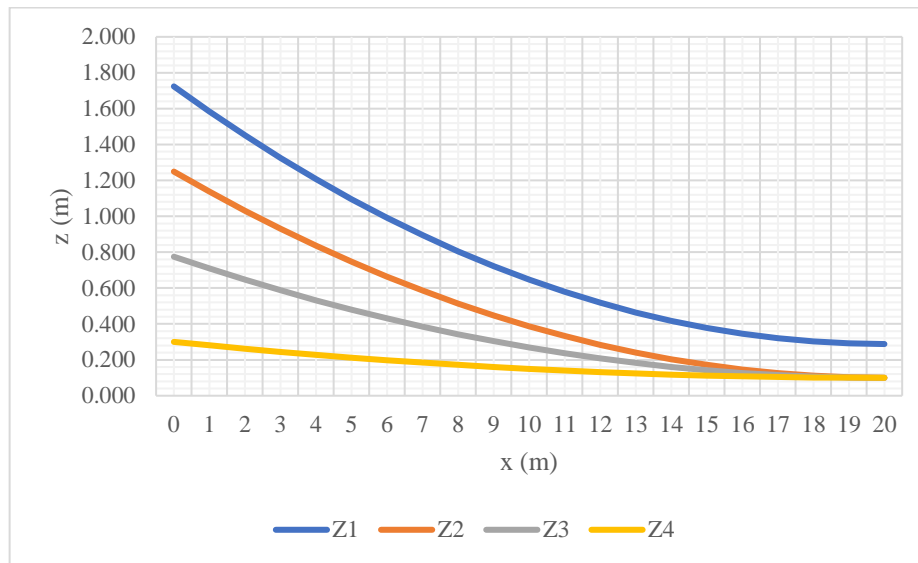
PCI-Girder H-210 *PCI-Girder H-170*

Gambar 5.41 Gelagar Prategang pada Tengah Bentang

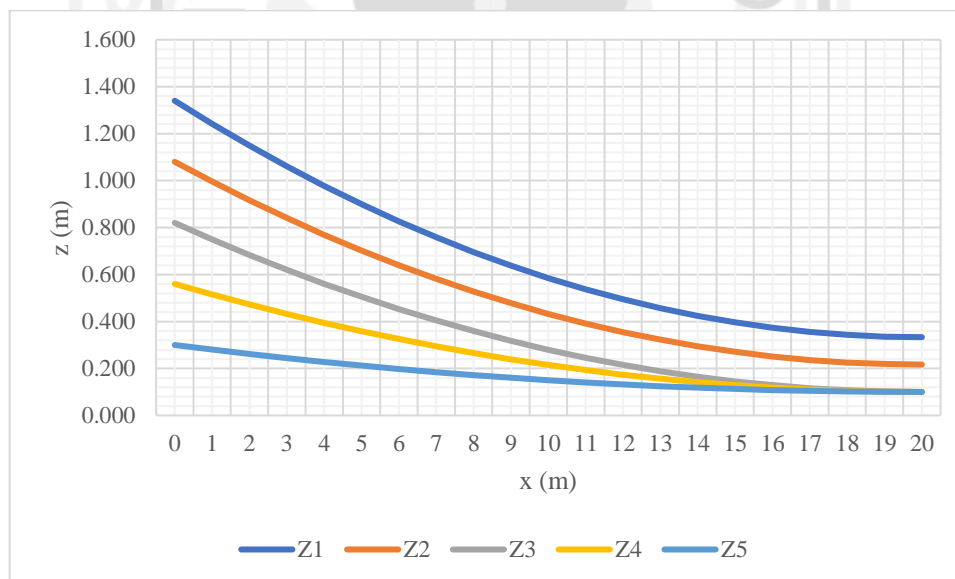


PCI-Girder H-210 *PCI-Girder H-170*

Gambar 5.42 Gelagar Prategang pada Tumpuan



Gambar 5.43 Tata Letak Tendon *PCI-Girder H-210*



Gambar 5.44 Tata Letak Tendon *PCI-Girder H-170*

4. Rekapitulasi Perhitungan Kehilangan Prategang

Rekapitulasi perhitungan kehilangan prategang pada *PCI-girder H-210* dan *PCI-girder H-170* dapat dilihat pada Tabel 5.34 berikut.

Tabel 5.34 Rekapitulasi Perhitungan kehilangan prategang pada PCI-Girder H-210 dan PCI-Girder H170

Data	Notasi	PCI-Girder H-210	PCI-Girder H-170	Satuan
Kehilangan Prategang Saat Tranfer				
Akibat gesekan	Δ_{fpF}	55,981	48,197	MPa
Akibat pergeseran ankur	Δ_{fpA}	33,863	38,705	MPa
Akibat perpendekan elastis	Δ_{fpES}	75,538	95,786	MPa
Kehilangan Prategang Saat Transfer Hingga Pengecoran Dek				
Akibat susut pada gelagar	Δ_{fpSR}	77,339	66,632	MPa
Akibat relaksasi tendon	Δ_{fpR1}	8	8	MPa
Akibat rangkai pada gelagar	Δ_{fpCR}	26,937	34,07	MPa
Kehilangan Prategang Saat Pengecoran Dek Hingga Waktu Akhir				
Akibat susut pada gelagar	Δ_{fpSD}	27,212	20,611	MPa
Akibat relaksasi tendon	Δ_{fpR2}	8	8	MPa
Akibat rangkai pada gelagar	Δ_{fpCD}	-5,783	-4,128	MPa
Akibat susut pada gelagar	Δ_{fpSS}	58,765	53,51	MPa
Persentase kehilangan prategang	$losses_final$	13,351	14,106	%

5. Rekapitulasi Perhitungan Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser

Rekapitulasi perhitungan kapasitas lentur dan kapasitas geser dapat dilihat pada Tabel 5.35 berikut.

Tabel 5.35 Perbandingan Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser

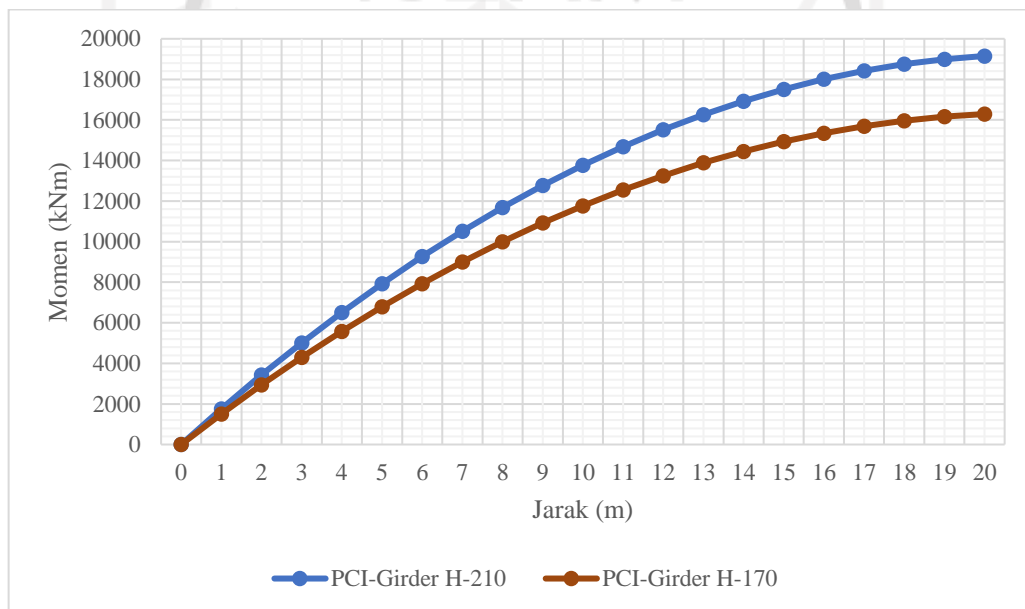
Data	Notasi	PCI-Girder H-210	PCI-Girder H-170	Satuan
Kapasitas Lentur	M_n	20387,882	18279,836	kNm
Kapasitas Geser	V_c	1773,33	1208,715	kN

5.4 Pembahasan

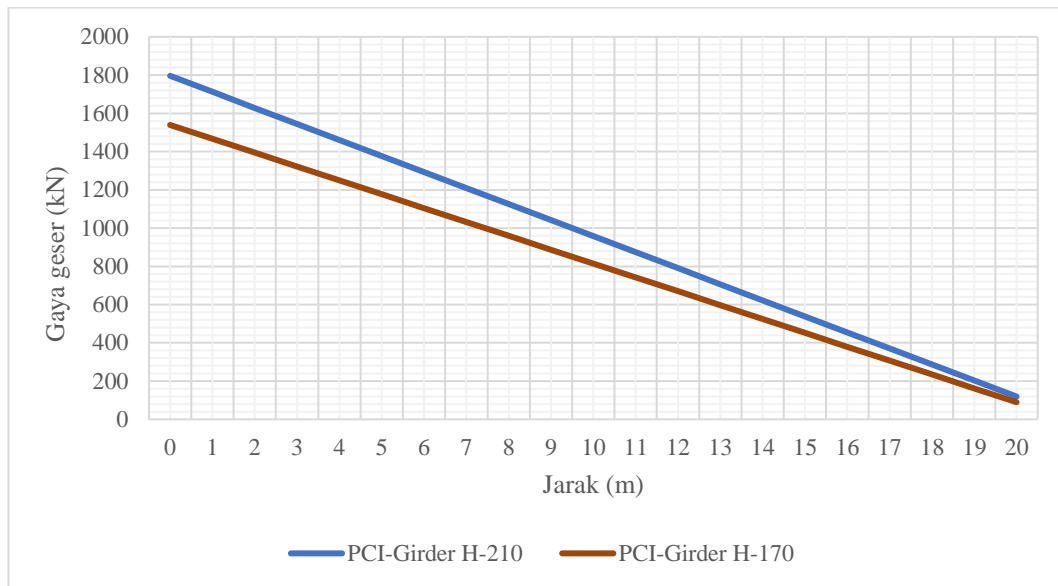
Pada subbab 5.3 telah dihasilkan data perhitungan pada *PCI-girder* H-210 dan *PCI-girder* H-170. Berikut adalah pembahasan mengenai hasil perhitungan yang telah dilakukan.

1. Momen dan Gaya Geser pada Gelagar

Berdasarkan perhitungan pada subbab 5.2.2 dihasilkan kombinasi pembebanan yang terbesar terjadi pada kombinasi pembebanan “Kuat I”. Dari perhitungan tersebut dihasilkan perbandingan seperti pada Gambar 5.45 dan Gambar 5.46.



Gambar 5.45 Perbandingan Diagram Momen *PCI-Girder* H-210 dan *PCI-Girder* H-170



Gambar 5.46 Perbandingan Diagram Momen *PCI-Girder H-210* dan *PCI-Girder H-170*

Berdasarkan Gambar 5.45 dihasilkan bahwa momen yang terjadi pada *PCI-girder H-210* lebih besar dibandingkan *PCI-girder H-170*. Artinya, semakin besar dimensi *PCI-girder* maka momen yang terjadi akan semakin besar juga. Begitu juga dengan gaya geser yang terjadi, berdasarkan Gambar 5.46 dihasilkan gaya geser pada *PCI-girder H-210* lebih besar dibandingkan dengan *PCI-girder H-170*. Artinya semakin besar dimensi *PCI-girder* maka gaya geser yang terjadi akan semakin besar juga.

2. Kebutuhan Tendon

Berdasarkan subbab 5.3 nomor 3 dihasilkan jumlah tendon yang dibutuhkan oleh *PCI-girder H-210* adalah sebanyak 4 tendon dengan 76 *strand*, sedangkan *PCI-girder H-170* dibutuhkan sebanyak 5 tendon dengan 95 *strand*. Artinya dengan data *PCI-girder* sesuai dengan katalog *PCI-girder PT.Wijaya Karya Beton Tbk.* yang dapat dilihat pada Gambar 4.4, jumlah tendon yang dibutuhkan oleh *PCI-girder H-210* lebih sedikit dibandingkan *PCI-girder H-170*, sehingga penggunaan *PCI-girder H-210* akan lebih hemat 20% jika dibandingkan penggunaan *PCI-girder H-170*.

3. Kehilangan Prategang

Berdasarkan Tabel 5.34 dihasilkan bahwa kehilangan prategang yang terjadi pada *PCI-girder* H-210 lebih kecil dibandingkan *PCI-girder* H-170. Sehingga, penggunaan *PCI-girder* H-210 lebih efektif dibandingkan penggunaan *PCI-girder* H-170. Hal ini dikarenakan semakin kecil kehilangan prategang yang terjadi maka akan semakin besar gaya prategang yang terjadi pada gelagar.

4. Kapasitas Lentur dan Kapasitas Geser

Berdasarkan Tabel 5.35 kapasitas lentur pada *PCI-girder* H-210 yaitu 20387,882 kNm lebih besar dibandingkan *PCI-girder* H-170 yaitu 18279,836 kNm. Artinya *PCI-girder* H-210 lebih baik dalam menahan beban lentur dibandingkan *PCI-girder* H-170 dengan rasio 1,115. Sedangkan kapasitas geser *PCI-girder* H-210 yaitu 1773,33 kN lebih besar dibandingkan *PCI-girder* H-170 yaitu 1208,715 kN. Artinya *PCI-girder* H-210 lebih baik dalam menahan beban geser dibandingkan *PCI-girder* H-170 dengan rasio 1,467.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Dari perhitungan pada *PCI-girder* H-210 dan *PCI-girder* H-170 didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Jumlah tendon yang dibutuhkan oleh *PCI-girder* H-210 lebih hemat 20% dibandingkan *PCI-girder* H-170.
2. Kehilangan prategang akhir yang terjadi pada *PCI-girder* H-210 sebesar 13,351% lebih kecil dibandingkan kehilangan prategang pada *PCI-girder* H-170 sebesar 14,106%. Sehingga, penggunaan *PCI-girder* H-210 lebih efektif dibandingkan penggunaan *PCI-girder* H-170 karena semakin kecil kehilangan prategang yang terjadi maka akan semakin besar gaya prategang yang terjadi pada gelagar.
3. *PCI-girder* H-210 lebih baik dalam menahan beban lentur dan beban geser dibandingkan *PCI-girder* H-170 dengan rasio 1,115 dan 1,467.

6.2 Saran

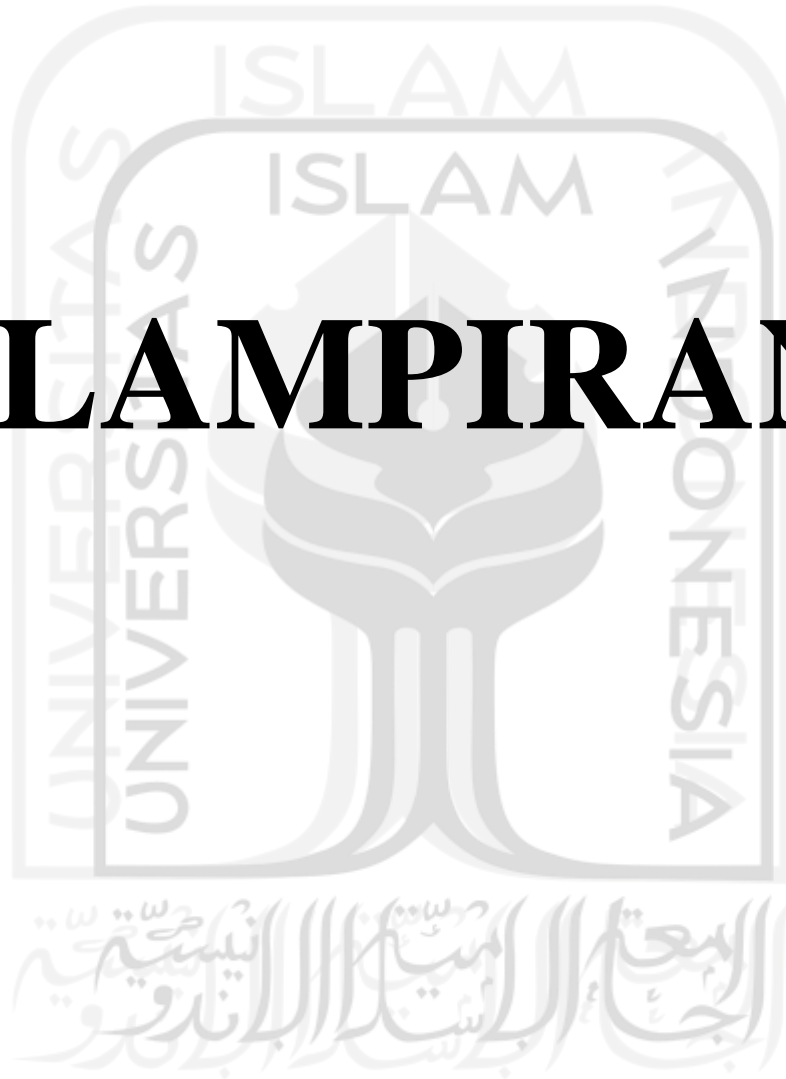
Setelah dilakukan penelitian di atas, berikut adalah saran penulis terhadap penelitian selanjutnya.

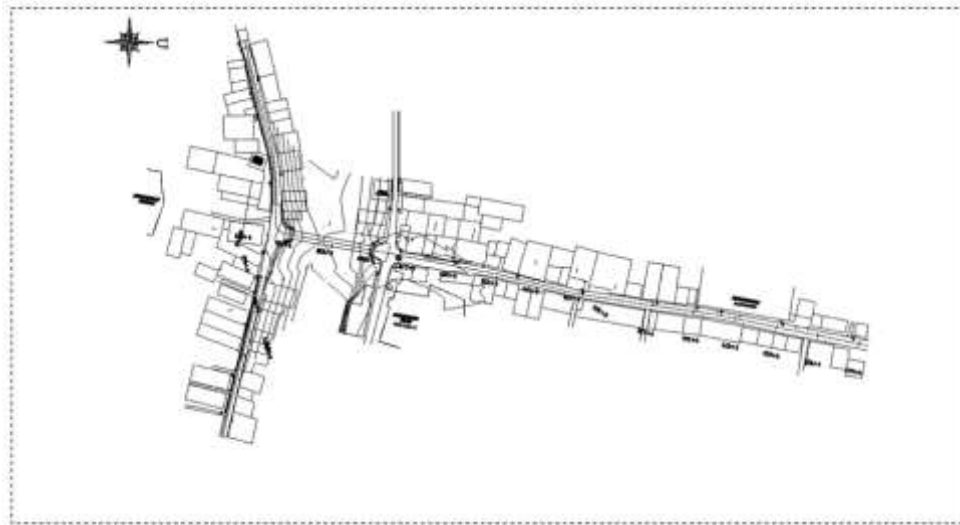
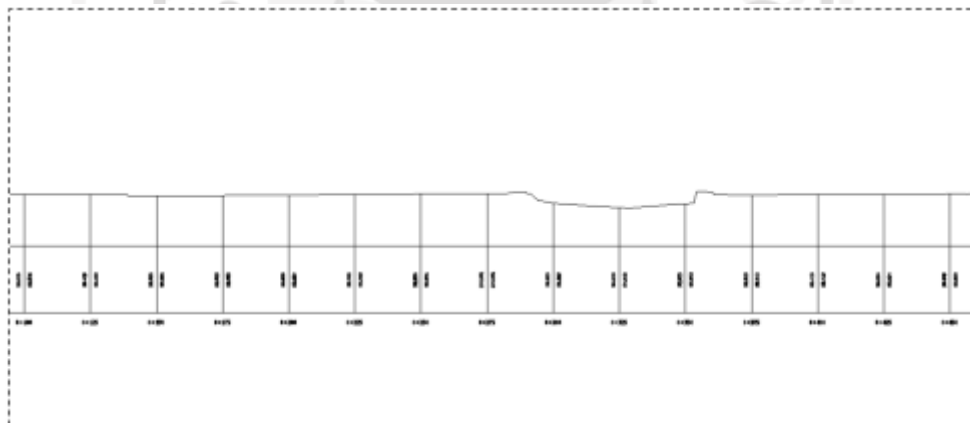
1. Diperlukan variabel lain untuk membandingkan kedua jenis *PCI-girder* tersebut agar didapatkan pemilihan yang lebih akurat. Contoh, variabel harga.
2. Dilakukan perbandingan antara dua tipe gelagar prategang yang berbeda untuk menentukan tipe yang lebih efektif.

DAFTAR PUSTAKA

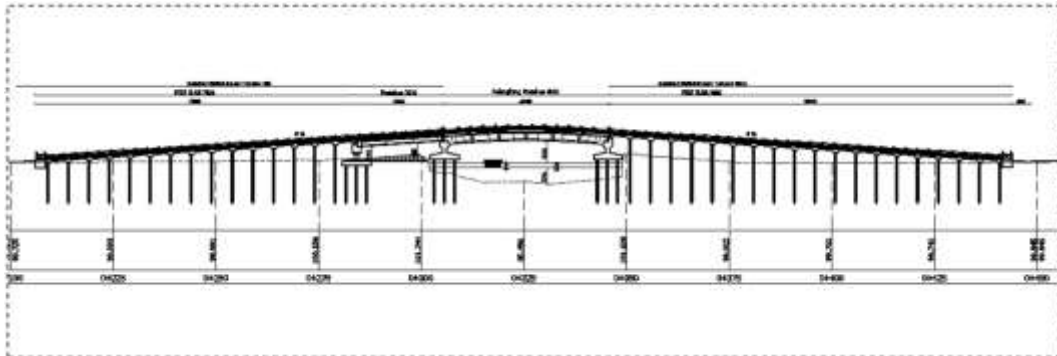
- AASHTO. 2017. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington D. C: AASHTO.
- Armin, H. M. dan Handono, B. D. 2018. Perencanaan Balok Girder Profil I pada Jembatan Prestressed dengan Variasi Bentang. *Jurnal Sipil Statik*.
- Badan Standardisasi Nasional. 2004. *Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: BSN.
- Badan Standardisasi Nasional. 2016. *Pembebanan untuk Jembatan*. Jakarta: BSN.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. 2021. *Panduan Praktis Perencanaan Teknis Jembatan*. Penerbit Bina Marga. Jakarta
- Hadipratomo, W. 2006. *Struktur Beton Prategang*. Bandung: NOVA,
- Jauhari, Z. A. dan Pertiwi, M. 2021. Desain PCI-Girder untuk Bentang 42 m Berdasarkan Pembebanan SNI 1725:2016 (Studi Kasus: Jalan Soebrantas, Desa Sei, Injab). *Seminar Nasional Industri dan Teknologi (SNIT)*. Politeknik Negeri Bengkalis.
- Naaman, A. E. 1982. Partially Prestressed Concrete. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*.
- Nusantoro, A., Widyananto, E., Alami, N., dan Prabuningrat, P. D. 2022. Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan di Desa Hargorojo dengan Menggunakan PCI Girder. *Jurnal Surya Beton*.

LAMPIRAN

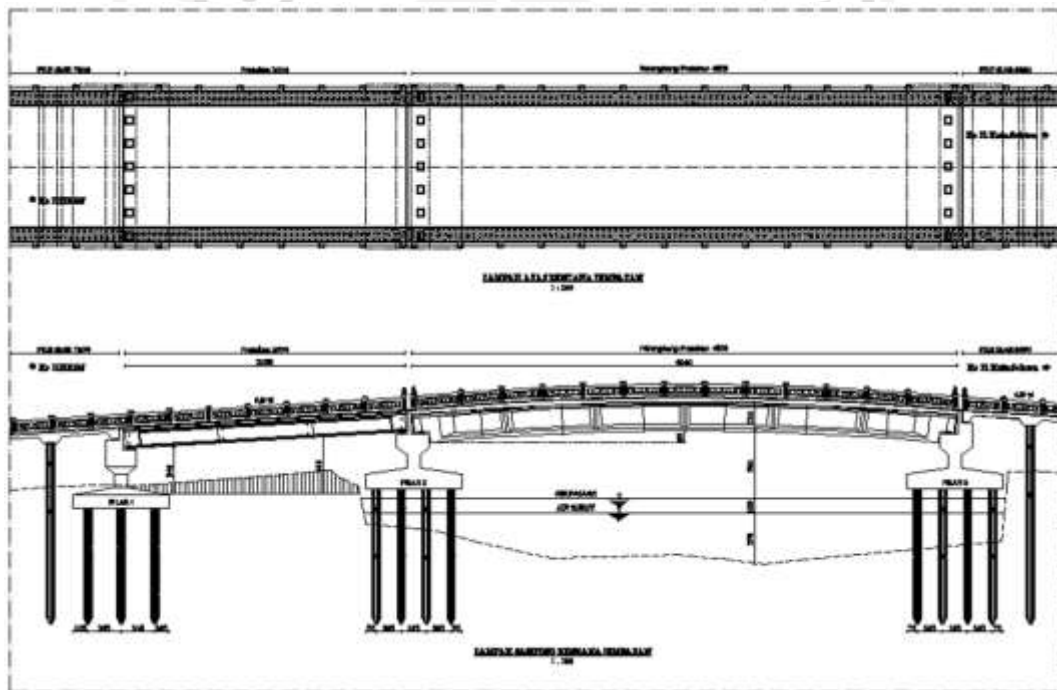


Lampiran 1 Data Topografi**Gambar L1.1 Situasi Hasil Pengukuran Topografi****Gambar L-1.2 *Long Section* Hasil Pengukuran Topografi**

Lampiran 2 Desain Jembatan HKSN



Gambar L-2.1 Long Section Jembatan HKSN



Gambar L-2.2 Tampak Atas dan Samping Jembatan HKSN

