

TUGAS AKHIR

**ANALISIS PENGARUH JUMLAH *STRANDS*
TERHADAP TOTAL KEHILANGAN GAYA
PRATENGANG PADA BALOK BETON PRATEGANG
TIPE PCI GIRDER**

***ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER OF
STRANDS ON THE TOTAL LOSS OF PRE-STRESSING
FORCE IN PRE-STRESSED CONCRETE BEAM TYPE
PCI GIRDER***

(Studi Kasus Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1)

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



**Andien Putri Aulia
22511071**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
2026**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH JUMLAH STRANDS TERHADAP TOTAL KEHILANGAN GAYA PRATENGANG PADA BALOK BETON PRATEGANG TIPE PCI GIRDER

ANALYSIS OF THE EFFECT OF THE NUMBER OF STRANDS ON THE TOTAL LOSS OF PRE-STRESSING FORCE IN PRE-STRESSED CONCRETE BEAM TYPE PCI GIRDER

(Studi Kasus Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1)

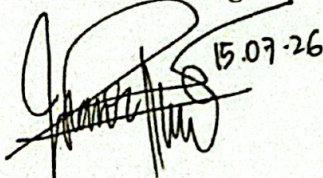
Disusun Oleh :

Andien Putri Aulia
22511071

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

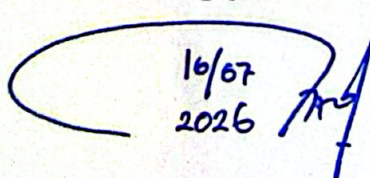
Diuji pada tanggal 17 Juni 2026
Oleh Dewan Penguji

Pembimbing

 15.07-26

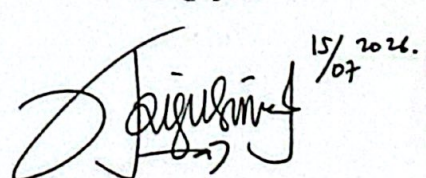
Astriaana Hardawati, S.T., M.Eng.
NIK : 165111301

Penguji I

 16/07
2026

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

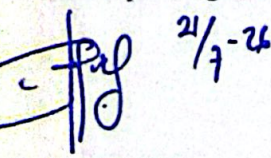
Penguji II

 15/07 2026.

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

Mengesahkan
Plt. Ketua Program Studi Teknik Sipil Program Sarjana



 21/7-26
Dina Anggraheni, S.T., M.Eng.

NIK : 165110105

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 ditemui 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 perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 20 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



Andien Putri Aulia

22511071

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil 'alamin, puji dan syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya, sehingga dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "Analisis Pengaruh Jumlah *Strands* terhadap Total Kehilangan Gaya Prategang pada Balok Prategang Tipe PCI *Girder* (Studi Kasus Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1)" dengan baik. Tugas Akhir ini disusun dan diajukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan jenjang Strata Satu pada Program Studi Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Penyusunan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan, doa, dan dukungan dari berbagai pihak. Bantuan tersebut sangat berarti selama proses penyusunan hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Maka dari itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak terkait.

1. Dinia Anggraheni, S.T., M.Eng. selaku Plt. Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
2. Ibu Astriana Hardawati, S.T., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, yang telah membimbing penulis dengan sabar, baik, dan penuh perhatian selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Jafar S.T., MURP., M.T. dan Bapak Anggit Mas Arifudin S.T., M.T. selaku Dosen Penguji I dan Dosen Penguji II, yang telah memberikan arahan, kritik, dan saran yang membantu penulis menyempurnakan Tugas Akhir ini.
4. Seluruh dosen dan pengajar Program Studi Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu selama masa perkuliahan.
5. PT Eskapindo Matra pada proyek Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1, yang telah membantu penulis dalam memperoleh data yang dibutuhkan untuk penyusunan Tugas Akhir ini.
6. Kedua orang tua penulis, Ayah dan Ibu tercinta, yang selalu menjadi sumber doa, dukungan, semangat dan kekuatan terbesar bagi penulis,

7. Adik penulis dan keluarga besar, yang selalu memberi warna dalam perjalanan penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Muhammad Rafi' seseorang yang sangat berarti bagi penulis, yang selalu hadir menemani, membantu, mendengarkan keluh kesah, dan memberikan semangat selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
9. Teman-teman terdekat penulis, Iqbal, Dika, Nevy, Sasa, dan Shafa, yang akrab penulis sebut sebagai *circle toxic*, tetapi justru menjadi sumber tawa, semangat, dan cerita paling berkesan selama proses ini.
10. Sasa, yang akrab penulis panggil Ica, teman penulis keliling Jogja di sela-sela proses penyusunan Tugas Akhir. Terima kasih atas tawa, cerita, dan kenangan manis yang diberikan.
11. Gembul, kucing kesayangan penulis, yang selalu hadir dengan tingkah lucunya dan menjadi penghibur kecil selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
12. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan, doa, dan dukungan selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.

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

Yogyakarta, 20 Juli 2026

Penulis



Andien Putri Aulia

DAFTAR ISI

TUGAS AKHIR	1
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xv
ABSTRAK	xxii
<i>ABSTRACT</i>	xxiii
BAB 1 PENDAHULUAN	10
1.1 Latar Belakang	10
1.2 Rumusan Masalah	12
1.3 Tujuan Penelitian	12
1.4 Manfaat Penelitian	12
1.5 Batasan Penelitian	13
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	14
2.1 Tinjauan Umum	14
2.2 Penelitian Terdahulu	14
2.2.1 Analisis Perbandingan Kehilangan Gaya Prategang pada Jembatan <i>Fly Over</i> Metode <i>Stressing</i> Satu Arah dan Dua Arah	14
2.2.2 Studi Alternatif <i>Loss of Prestress</i> PCI Girder Akibat Metode <i>Single Stressing</i> dan <i>Double Stressing</i> pada <i>Section Overpass</i> STA 52+174 Jalan Tol Balikpapan-Samarinda	15
2.2.3 Analisis Kehilangan Gaya Prategang Girder pada Jembatan Proyek Pembangunan Jalan Tol Tebing Tinggi-Inderapura	16

2.2.4	Perencanaan Alternatif Tendon Prategang dengan Variasi Tata Letak	
	Tendon dan Mutu Tendon pada Struktur Atas Jembatan	16
2.2.5	Kajian Analisis Struktur PCI <i>Girder Prestressed</i> pada Jembatan	
	Bentang 35,8 meter	17
2.3	Keaslian Penelitian	20
BAB 3	LANDASAN TEORI	21
3.1	Tinjauan Umum	21
3.2	Pengertian Jembatan	21
3.2.1	Struktur Jembatan	21
3.3	Beton Prategang	22
3.3.1	Gaya Prategang	22
3.3.2	Konsep Dasar Beton Prategang	23
3.3.3	Metode Prategang	27
3.3.4	Keuntungan dan Kekurangan Beton Prategang	29
3.4	Baja Prategang	29
3.4.1	Jenis Baja Prategang	30
3.4.2	Relaksasi	33
3.4.3	Korosi	34
3.5	Baja Tulangan (Non-Prategang)	34
3.6	Tahap Pembebanan	36
3.7	Pembebanan Jembatan	36
3.7.1	Beban Mati	37
3.7.2	Beban Lalu Lintas	38
3.7.3	Beban Lingkungan	42
3.7.4	Beban Gempa	43
3.7.5	Kombinasi Pembebanan	43
3.8	Kehilangan Gaya Prategang	44
3.8.1	Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Angkur (<i>Anchorage Friction</i>)	44
3.8.2	Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Cable (<i>Jack Friction</i>)	45

3.8.3 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pemendekan Elastis (<i>Elastic Shortening</i>)	45
3.8.4 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pengangkuran (<i>Anchoring</i>)	46
3.8.5 Kehilangan Gaya Prategang Akibat <i>Relaxation of Tendon</i>	46
BAB 4 METODELOGI PENELITIAN	48
4.1 Tinjauan Umum	48
4.2 Lokasi Penelitian	48
4.3 Pengumpulan Data	49
4.4 Tahap Analisis	49
4.5 Tahap Penelitian	50
BAB 5 ANALISIS DAN PEMBAHASAN	52
5.1 Tinjauan Umum	52
5.2 Perhitungan Struktur PCI <i>Girder</i>	52
5.2.1 Perhitungan Struktur Utama	53
5.3 Pembebanan	59
5.3.1 Beban Sendiri (MS)	59
5.3.2 Beban Mati Tambahan (MA)	62
5.3.3 Beban Lajur D	63
5.3.4 Gaya Rem (TB)	64
5.3.5 Beban Angin (EW)	65
5.3.6 Beban Gempa (EQ)	65
5.3.7 Rekapitulasi Pembebanan	67
5.3.8 Kombinasi Beban	68
5.4 Perhitungan Gaya Prategang , Tendon dan Eksentrisitas	69
5.4.1 Gaya Prategang	69
5.4.2 Jumlah Tendon	71
5.4.3 Posisi Tendon di Tengah Bentang	74
5.4.4 Posisi Tendon di Tumpuan	75
5.4.5 Eksentrisitas, Lintasan dan Tata Letak Tendon	76
5.5 Kehilangan Gaya Prategang (<i>Loss of Prestress</i>) pada <i>Cable</i>	77

5.5.1 Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Angkur (<i>Anchorage Friction</i>)	77
5.5.2 Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Tendon (<i>Jack Friction</i>)	77
5.5.3 Kehilangan Gaya Prategang akibat Pemendekan Elastis (<i>Elastic Shortening</i>)	78
5.5.4 Kehilangan Gaya Prategang akibat Pengangkuran (<i>Anchoring</i>)	80
5.5.5 Kehilangan Gaya Prategang akibat <i>Relaxation of Tendon</i>	81
5.6 Pengaruh Jumlah <i>Strands</i> terhadap Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kehilangan Gaya Prategang	85
5.6.1 Gesekan Angkur (<i>Anchorage Friction</i>)	85
5.6.2 Gesekan Tendon (<i>Jack Friction</i>)	87
5.6.3 Pemendekan Elastis (<i>Elastic Shortening</i>)	88
5.6.4 Pengangkuran (<i>Anchoring</i>)	90
5.6.5 <i>Relaxation of Tendon</i>	92
5.6.6 Jumlah <i>Strands</i> pada Beton Prategang dan Hubungannya dengan Kehilangan Gaya Prategang	94
BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN	102
6.1 Kesimpulan	102
6.2 Saran	103
DAFTAR PUSTAKA	104
LAMPIRAN	107

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang	18
Tabel 3.1 Kawat-Kawat untuk Beton Prategang	32
Tabel 3.2 Strand Standar 7 Kawat untuk Beton Prategang	33
Tabel 3.3 Berat Isi dan Kerapatan Massa untuk Beban Mati	37
Tabel 3.4 Faktor Beban Berat Sendiri	38
Tabel 3.5 Faktor Beban Mati Tambahan	38
Tabel 3.6 Faktor Beban Lajur “D”	39
Tabel 3.7 Faktor Beban untuk Beban “T”	40
Tabel 3.8 Komponen Beban Angin yang Bekerja pada Kendaraan	43
Tabel 5.1 <i>Properties Strands I Girder</i>	54
Tabel 5.2 Dimensi PCI <i>Girder</i>	55
Tabel 5.3 Inersia Momen Balok Prategang	56
Tabel 5.4 Inersia Momen Balok Composit	58
Tabel 5.5 Rekapitulasi Pembebanan	67
Tabel 5.6 Faktor Ultimit Kombinasi Pembebanan yang digunakan	68
Tabel 5.7 Rekapitulasi Kombinasi Momen Ultimit	68
Tabel 5.8 Rekapitulasi Kombinasi Beban Gaya Geser	69
Tabel 5.9 Posisi Penyebaran Tendon	72
Tabel 5.10 Hasil Perhitungan Variasi Jumlah Strands dan Persentase Jacking Force	73
Tabel 5.11 Jumlah Tendon Masing-Masing Baris	75
Tabel 5.12 Momen Statis	76
Tabel 5.13 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Angkur	85
Tabel 5.14 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Tendon	87
Tabel 5.15 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Pemendekan Elastis	89
Tabel 5.16 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Pengangkuran	90
Tabel 5.17 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Relaxation of Tendon	92

Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Analisis Kehilangan Gaya Prategang Total pada Jumlah <i>Strands</i> Eksisting.	94
Tabel 5.19 Rekapitulasi Hasil Analisis Kehilangan Gaya Prategang Total terhadap Variasi Jumlah Strands.	96
Tabel 5.20 Faktor Kehilangan Gaya Prategang	100

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Penampang PCI Girder dan Susunan <i>Strands</i>	11
Gambar 3.1 Beton Prategang Pada Balok Beton	22
Gambar 3.2 Pemberian Prategang Melingkar	23
Gambar 3.3 Distribusi Tegangan Beton Prategang	24
Gambar 3.4 Momen Penahan Internal Pada Beton Prategang dan Beton Bertulang	25
Gambar 3.5 Balok Beton Menggunakan Baja Mutu Tinggi	26
Gambar 3.6 Beton Prategang	26
Gambar 3.7 Beton Prategang Pratarik	27
Gambar 3.8 Beton Prategang Pascatarik	28
Gambar 3.9 Kawat Tunggal (Wire)	30
Gambar 3.10 Kawat Untaian (Strands)	31
Gambar 3.11 Kawat Batangan (Bar)	32
Gambar 3.12 Tulangan Non-Prategang Penahan Tarik di Tengah Bentang	34
Gambar 3.13 Tulangan Non-Prategang Penahan Tarik di Tepi Bentang	35
Gambar 3.14 Tulangan Non-Prategang Penahan Tekan	35
Gambar 3.15 Tulangan Non-Prategang Penahan Lentur	35
Gambar 3.16 Tulangan Non-Prategang Penahan Retak	36
Gambar 3.17 Beban Lajur “D”	39
Gambar 3.18 Pembebanan Truk “T” (500 kN)	40
Gambar 3.19 Faktor Beban Dinamis	41
Gambar 4.1 Peta Lokasi Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1	48
Gambar 4.2 <i>Flowchart</i> Penelitian	51
Gambar 5.1 Potongan Melintang <i>Elevated</i>	52
Gambar 5.2 Detail Dimensi PCI <i>Girder</i>	54
Gambar 5.3 Inersia Momen Balok Prategang	55
Gambar 5.4 Inersia Momen Balok Composit	57
Gambar 5.5 Beban Sendiri Balok Prategang	59
Gambar 5.6 Diafragma antar Girder	61

Gambar 5.7 Beban Lajur D	63
Gambar 5.8 Gaya Rem	64
Gambar 5.9 Beban Angin	65
Gambar 5.10 Beban Gempa	65
Gambar 5.11 Diagram Tegangan Kondisi Awal (<i>Transfer</i>)	70
Gambar 5.12 Posisi Tendon di Tengah Bentang	74
Gambar 5.13 Posisi Tendon di Tumpuan	75
Gambar 5.14 Layout Tendon	76
Gambar 5.15 Titik Koordinat Tendon	77
Gambar 5.16 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Angkur	86
Gambar 5.17 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Tendon	88
Gambar 5.18 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Pemendekan Elastis	89
Gambar 5.19 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Pengangkuran	91
Gambar 5.20 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat <i>Relaxation of Tendon</i>	93
Gambar 5.21 Grafik Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang	95

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Detail Engineering Desain	108
--------------------------------------	-----

DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

PCI	= <i>Precast Concrete I Girder</i>
<i>Stressing</i>	= Proses penarikan tendon prategang
<i>Overlay</i>	= Lapisan tambahan perkerasan
<i>Strands</i>	= Kabel baja prategang
ASTM	= <i>American Society for Testing and Materials</i>
A-416	= Standar ASTM untuk baja prategang
U-40	= Mutu baja tulangan dengan kuat leleh 400 MPa
U-24	= Mutu baja tulangan dengan kuat leleh 240 MPa
L	= Panjang bentang (m)
s	= Jarak antar <i>girder</i> (m)
ta (ho)	= Tebal pelat lantai jembatan (m)
tb (ha)	= Tebal lapisan aspal dan <i>overlay</i> (m)
th	= Tinggi genangan air hujan (m)
D _{PS}	= Diameter <i>strands</i> (mm)
D	= Diameter tulangan (mm)
A _{st}	= Luas penampang nominal satu <i>strands</i> (mm ²)
n _{st}	= Jumlah kawat untaian dalam satu tendon (untaian)
f'c	= Kuat tekan beton (MPa)
f''c	= Kuat tekan beton saat <i>stressing</i> (MPa)
F _y	= Kuat leleh baja tulangan (MPa)
F _{pu}	= Kuat tarik <i>strands</i> (MPa)
F _{py}	= Tegangan leleh <i>strands</i> (MPa)
P _{bs}	= Beban putus satu <i>strands</i> (kN)
W _c	= Berat jenis beton prategang (kN/m ³)
E _c	= Modulus elastisitas beton (MPa)

$E_c \text{ plat}$	= Modulus elastisitas beton pelat (MPa)
E_s	= Modulus elastisitas baja atau <i>strands</i> (MPa)
H	= Tinggi penampang balok (m)
A	= Luas penampang balok (m^2)
C_g	= Letak titik berat
y_b	= Titik berat dari bawah (m)
y_a	= Titik berat dari atas (m)
$\Sigma A.y$	= Jumlah momen statis luas penampang (m^3)
$\Sigma A.y^2$	= Jumlah hasil perkalian luas dengan kuadrat jarak (m^4)
I_o	= Momen inersia tiap bagian penampang (m^4)
I_b	= Momen inersia terhadap alas balok (m^4)
I_x	= Momen inersia terhadap titik berat balok (m^4)
W_a	= Tahanan momen sisi atas (m^3)
W_b	= Tahanan momen sisi bawah (m^3)
b	= Lebar bagian penampang (m)
h	= Tinggi bagian penampang (m)
y	= Jarak titik berat bagian terhadap alas (m)
H_c	= Tinggi total balok <i>composit</i> (m)
A_c	= Luas penampang balok <i>composit</i> (m^2)
C_{gc}	= Letak titik berat <i>composit</i>
y_{bc}	= Titik berat penampang <i>composit</i> dari bawah (m)
y_{ac}	= Titik berat penampang <i>composit</i> dari atas (m)
I_{bc}	= Momen inersia terhadap alas balok <i>composit</i> (m^4)
I_{xc}	= Momen inersia terhadap titik berat balok <i>composit</i> (m^4)
W_{ac}	= Tahanan momen sisi atas pelat (m^3)
W'_{ac}	= Tahanan momen sisi atas balok (m^3)
W_{bc}	= Tahanan momen sisi bawah balok <i>composit</i> (m^3)

M_S	= Beban sendiri
Q_{MS}	= Beban merata akibat beban sendiri (kN/m)
V_{MS}	= Gaya geser akibat beban sendiri (kN)
M	= Momen (kNm)
M_A	= Beban mati tambahan
W_{aspal}	= Berat jenis aspal (kN/m ³)
Q_{MA}	= Beban merata akibat beban mati tambahan (kN/m)
V_{MA}	= Gaya geser akibat beban mati tambahan (kN)
M_{MA}	= Momen akibat beban mati tambahan (kNm)
W_{air}	= Berat jenis air hujan (kN/m ³)
t_{hujan}	= Tinggi genangan air hujan (m)
q	= Intesitas beban merata lajur D (kPa)
p	= Beban garis terpusat (kN/m)
Q_{TD}	= Beban terbagi merata akibat beban lajur D (kN/m)
FBD	= Faktor beban dinamis
P_{TD}	= Beban terpusat pada balok akibat beban lajur D (kN)
V_{TD}	= Gaya geser balok akibat beban lajur D (kN)
M_{TD}	= Momen balok akibat beban lajur D (kNm)
TD	= Beban lajur D
TB	= Gaya rem
BTR	= Berat gandar truk desain (kN)
PTB	= Beban rem (kN)
V_{TB}	= Gaya geser akibat gaya rem (kN)
M_{TB}	= Momen akibat gaya rem (kNm)
EW	= Beban angin
TEW	= Tekanan merata akibat beban angin (kN/m)
Q_{EW}	= Transfer beban angin (kN/m)

V_{EW}	= Gaya geser akibat beban angin (kN)
M_{EW}	= Momen akibat beban angin (kNm)
EQ	= Beban gempa
W_t	= Berat total jembatan (kN)
K	= Kekakuan balok (kN/m)
T	= Waktu getar (detik)
g	= Percepatan gravitasi (m/detik ²)
C	= Koefisien geser dasar
F	= Faktor perangkaan
S	= Faktor tipe struktur
K_h	= Koefisien beban gempa horizontal
K_v	= Koefisien beban gempa vertikal
T_{EQ}	= Gaya gempa vertikal (kN)
Q_{EQ}	= Beban gempa vertikal (kN/m)
V_{EQ}	= Gaya geser akibat beban gempa (kN)
M_{EQ}	= Momen akibat beban gempa (kNm)
F_{ci}'	= Kuat tekan beton pada kondisi awal (kPa)
M_b	= Momen berat sendiri <i>girder</i> (kNm)
Z_o	= Jarak titik berat tendon (m)
e_s	= Eksentrisitas tendon (m)
P_{t1}	= Tegangan di sera atas (kN)
P_{t2}	= Tegangan di serat bawah (kN)
P_t	= Gaya prategang awal (kN)
P_{b1}	= Beban putus satu tendon (kN)
Φ	= Faktor reduksi putus satu <i>strands</i>
n_t	= Jumlah tendon yang dibutuhkan
$n_{s \text{ min}}$	= Jumlah <i>strands</i> minimum yang dibutuhkan

n_s pakai	= Jumlah <i>strands</i> yang digunakan
P_o	= Persentase tegangan leleh (%)
P_j	= Gaya prategang akibat <i>jacking</i> (kN)
P_{eff}	= Gaya prategang akhir efektif (kN)
a	= Jarak alas ke titik berat tendon baris ke-1 (m)
n_{t2}	= Jumlah <i>strands</i> minimum dalam satu tendon (<i>strands</i>)
y_d	= Jarak vertikal antar tendon (m)
Z_2	= Jarak baris tendon ke-2 terhadap alas (m)
n_1	= Jumlah tendon baris ke-1
n_2	= Jumlah tendon baris ke-2
n_3	= Jumlah tendon baris ke-3
n_4	= Jumlah tendon baris ke-4
a'	= Jarak tendon bawah terhadap alas (m)
y_e	= Jarak titik berat penampang terhadap tendon terbawah (m)
n_i	= Baris tendon ke- i
n_{si}	= Jumlah <i>strands</i> pada baris tendon ke- i
y_d'	= Jarak antar baris tendon (m)
$\sum n_i$	= Jumlah momen statis baris tendon
P_o	= Gaya prategang setelah kehilangan akibat gesekan angkur (kN)
α	= Koefisien alfa (rad)
μ	= Koefisien gesek
β	= Koefisien <i>wobble</i>
e	= Bilangan euler
P_x	= Gaya prategang setelah kehilangan akibat gesekan tendon (kN)
L_x	= Panjang tendon yang ditinjau dari titik penarikan (m)
LOP	= <i>Loss of Prestress</i> atau kehilangan gaya prategang (kN)
A_t	= Luas total tendon (m ²)

i	= Jari-jari inersia penampang (m)
K_e	= Koefisien elastisitas
σ_{pi}	= Tegangan baja prategang sebelum <i>loss of prestress</i> (kPa)
$\Delta\sigma_{pe}'$	= Kehilangan tegangan regangan elastis pengaruh berat sendiri (kPa)
σ_{bt}	= Tegangan beton pada level baja akibat gaya prategang (kPa)
$\Delta\sigma_{pe}$	= Kehilangan tegangan regangan elastis tanpa berat sendiri (kPa)
ΔP_e	= Kehilangan gaya prategang akibat pemendekan elastis (kN)
ΔL	= Panjang tarik masuk (m)
m	= Kemiringan diagram gaya (kN/m)
L_{max}	= Jarak pengaruh <i>slip</i> angkur (m)
ΔP_{Angkur}	= Kehilangan gaya prategang akibat angkur (kN)
P'	= Gaya prategang efektif setelah kehilangan angkur (kN)
P_{max}	= Gaya prategang maksimum setelah seluruh kehilangan (kN)
ϵ_b	= Regangan dasar susut
k_b	= Koefisien pemakaian semen
k	= Keliling penampang (m)
e_m	= Tebal teoritis penampang (m)
k_e	= Koefisien tebal teoritis
$ptul$	= Persentase luas tulangan (%)
k_p	= Koefisien luas tulangan
$\Delta\epsilon_{su}$	= Regangan susut
σ_{sh}	= Tegangan susut (kPa)
P_i	= Gaya prategang saat <i>transfer</i> di tengah bentang (kN)
UTS	= <i>Ultimate Tensile Strenght</i> (%)
f_a	= Tegangan beton pada serat atas (kPa)
f_b	= Tegangan beton pada serat bawah (kPa)
k_c	= Koefisien kelembaban udara

t	= Jumlah hari pengerasan (hari)
T_{udara}	= Temperatur udara rata-rata ($^{\circ}\text{C}$)
t'	= Umur pengerasan beton (hari)
k_d	= Koefisien pengerasan beton
k_{tn}	= Koefisien umur beton
ϵ_{cr}	= Regangan akibat <i>creep</i>
σ_{cr}	= Tegangan akibat <i>creep</i> (kPa)
$\Delta\sigma_{sc}$	= Total kehilangan tegangan akibat <i>creep</i> dan susut (kPa)
X	= Faktor hubungan tegangan awal prategang terhadap UTS
C_{rel}	= Nilai relaksasi setelah 1000 jam pada 70% beban putus (%)
σ_r	= Tegangan relaksasi (kPa)
Δp	= Kehilangan gaya prategang akibat jangka panjang (kN)
P_{eff}	= Gaya prategang efektif di tengah bentang (kN)

ABSTRAK

Strands baja pada beton prategang berfungsi memberikan gaya prategang agar balok mampu menahan beban besar dengan lebih efisien. Pada proyek Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1, balok PCI *girder* menggunakan 62 *strands*. Jumlah tersebut dapat berbeda dengan kebutuhan desain karena kondisi teknis pelaksanaan, kebutuhan kapasitas struktur, dan efisiensi pekerjaan. Penambahan jumlah *strands* dapat meningkatkan kapasitas lentur balok, tetapi juga mengubah besarnya kehilangan gaya prategang. Berdasarkan kondisi tersebut, analisis pengaruh variasi jumlah *strands* terhadap kehilangan gaya prategang penting dilakukan untuk mengetahui faktor kehilangan yang memberikan pengaruh terbesar terhadap gaya prategang.

Penelitian ini menggunakan metode analisis kuantitatif dengan data proyek Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1. Analisis dimulai dari jumlah *strands* eksisting di lapangan, yaitu 62 *strands*. Hasil perhitungan kebutuhan *strands* menunjukkan bahwa jumlah *strands* yang dibutuhkan adalah 46 *strands*. Perbedaan antara jumlah *strands* eksisting dan jumlah *strands* hasil perhitungan menjadi dasar analisis pengaruh variasi jumlah *strands* terhadap kehilangan gaya prategang. Faktor kehilangan gaya prategang yang dianalisis meliputi *anchorage friction*, *jack friction*, *elastic shortening*, *anchoring*, dan *relaxation of tendon*. SNI 1725:2016 digunakan sebagai pedoman perhitungan pembebanan jembatan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jumlah *strands* berpengaruh terhadap total kehilangan gaya prategang. Pada kondisi 46 *strands*, yaitu jumlah yang diperoleh dari hasil perhitungan, total kehilangan gaya prategang sebesar 23,9%. Kehilangan gaya prategang tersebut meningkat menjadi 28,6% pada kondisi eksisting dengan 62 *strands*, dengan rata-rata kenaikan sebesar 1,1% untuk setiap penambahan satu *strands*. Faktor kehilangan gaya prategang yang memberikan pengaruh terbesar adalah *elastic shortening*, kemudian *anchoring* dan *relaxation of tendon*.

Kata kunci: Beton Prategang, PCI *Girder*, *Strands*, Kehilangan gaya prategang

ABSTRACT

Steel strands in prestressed concrete function to provide prestressing force so that beams can resist large loads more efficiently. In the Yogyakarta-Bawen Toll Road Project Package 1 Section 1, the PCI girder used 62 strands. This number may differ from the design requirement due to technical construction conditions, structural capacity needs, and work efficiency. Increasing the number of strands can improve the flexural capacity of the beam, but it also affects the magnitude of prestress loss. Based on this condition, an analysis of the effect of variations in the number of strands on prestress loss is important to determine the loss factor that has the greatest influence on the prestressing force.

This study used a quantitative analysis method based on data from the Yogyakarta-Bawen Toll Road Project Package 1 Section 1. The analysis began with the existing number of strands used in the field, namely 62 strands. The calculation results showed that the required number of strands was 46 strands. The difference between the existing number of strands and the calculated number of required strands became the basis for analyzing the effect of strand variation on prestress loss. The prestress loss factors analyzed in this study included anchorage friction, jack friction, elastic shortening, anchoring, and relaxation of tendon. SNI 1725:2016 was used as the guideline for calculating bridge loading.

The results showed that variations in the number of strands affected the total prestress loss. In the condition with 46 strands, which was obtained from the calculation results, the total prestress loss was 23,9%. This prestress loss increased to 28,6% in the existing condition with 62 strands, with an average increase of 1.1% for each additional strand. The prestress loss factor with the greatest influence was elastic shortening, followed by anchoring and relaxation of tendon.

Keywords: *Prestressed Concrete, PCI Girder, Strands, Loss of Prestress*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton prategang merupakan teknologi konstruksi yang telah banyak digunakan dalam berbagai jenis bangunan, baik itu jembatan, gedung bertingkat, maupun infrastruktur lainnya. Salah satu keuntungan utama dari beton prategang adalah kemampuannya untuk menahan beban lebih besar dengan penggunaan material beton yang lebih efisien. Dalam sistem ini, *strands* baja berfungsi untuk memberikan tegangan pada beton, yang pada gilirannya akan meningkatkan kapasitas struktur dalam menahan beban. Salah satu tipe balok beton yang banyak digunakan adalah balok beton tipe PCI Girder, yang menggunakan *strands* baja dalam jumlah tertentu untuk memberikan tegangan pada beton. Meskipun memberikan berbagai keunggulan, penggunaan *strands* dalam jumlah tertentu dapat mempengaruhi kinerja struktur secara signifikan, khususnya terkait dengan kehilangan tegangan yang terjadi pada *strands* tersebut Nawy (2001).

Kehilangan gaya prategang pada *strands* adalah masalah yang sering terjadi dalam beton prategang. Proses ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk gesekan pada ankur dan tendon, perubahan elastis beton, serta peluruhan tegangan akibat relaksasi material *strands* itu sendiri. Kehilangan gaya prategang yang terjadi akan mempengaruhi kinerja struktural, yang pada akhirnya dapat menurunkan efisiensi dan keselamatan struktur. Dengan demikian, meskipun penggunaan *strand* merupakan elemen penting dalam desain beton prategang, adanya kehilangan gaya prategang yang terjadi memerlukan perhatian lebih dalam perancangannya Nawy (2001).

Salah satu faktor yang diperkirakan memiliki pengaruh signifikan terhadap kehilangan gaya prategang adalah jumlah *strands* yang digunakan dalam balok beton prategang. Meski demikian, jumlah *strands* tidaklah satu-satunya faktor, seperti yang diungkapkan dalam penelitian sebelumnya tentang variasi tata letak

untuk mengkaji lebih jauh bagaimana jumlah *strands* mempengaruhi kehilangan tegangan pada balok beton tipe PCI Girder, serta untuk mengidentifikasi faktor-faktor lain seperti *anchorage friction*, *jack friction*, *elastic shortening*, *anchoring* dan *relaxation of tendon* yang paling berpengaruh terhadap kehilangan tegangan. Dengan pemahaman yang lebih mendalam tentang aspek ini, diharapkan dapat dikembangkan desain balok beton prategang yang lebih efisien, aman, dan optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Fokus penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut, berdasarkan latar belakang dan analisis metode perhitungan balok prategang:

1. Bagaimana pengaruh jumlah total *strands* terhadap total kehilangan gaya prategang pada balok beton tipe PCI Girder?
2. parameter kehilangan gaya prategang apa saja yang paling terpengaruh oleh jumlah *strands*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dijelaskan, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh jumlah *strands* terhadap total kehilangan gaya prategang pada balok beton tipe PCI Girder.
2. Mengidentifikasi parameter kehilangan gaya prategang yang paling terpengaruh oleh jumlah *strands*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi dalam memperdalam pemahaman tentang faktor-faktor yang mempengaruhi kehilangan gaya prategang pada *strands* dalam beton prategang.
2. Memberikan pemahaman dalam menentukan jumlah *strands* yang tepat pada balok prategang.

1.5 Batasan Penelitian

Agar pembahasan lebih terarah, penelitian ini dibatasi pada hal-hal berikut:

1. Data penelitian berasal dari proyek Jalan Tol Yogyakarta-Bawen paket 1 seksi 1 dan Lokasi penelitian difokuskan pada STA 76+300 .
2. Penelitian hanya membahas pengaruh jumlah *strands* pada balok beton prategang tipe PCI *Girder* terhadap kehilangan gaya prategang.
3. Kehilangan gaya prategang yang dianalisis terbatas pada faktor-faktor yang melibatkan jumlah *strands*, seperti (*anchorage friction, jack friction, elastic shortening, anchoring* dan *relaxation of tendon*).
4. Pedoman yang digunakan dalam penelitian ini yaitu SNI 1725:2016 mengenai persyaratan umum beton prategang, dan mengacu pada pedoman perhitungan yang terdapat dalam buku Nawy (2001) dan Lin.Y.T & Burns (1988)
5. Penelitian ini menggunakan metode analisis kuantitatif dengan menggunakan *Microsoft Excel* untuk menghitung jumlah *strands* terhadap kehilangan gaya prategang.
6. Analisis difokuskan pada kehilangan gaya prategang, aspek lain seperti desain, biaya dan waktu tidak termasuk.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Umum

Tinjauan pustaka merupakan kegiatan untuk mengkaji berbagai literatur dan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang berkaitan dengan topik yang akan diteliti. Bagian ini berisi penjelasan mengenai teori-teori dasar yang mendukung penelitian, seperti konsep beton prategang, tegangan *stressing*, serta pengaruh jumlah *strands* terhadap total kehilangan gaya prategang pada balok beton prategang. Selain itu, akan dibahas mengenai beberapa penelitian terdahulu yang relevan sebagai dasar dan pembandingan dalam penelitian sekarang.

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai struktur beton prategang, khususnya pada elemen jembatan seperti *girder*, telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Hasil dari penelitian terdahulu memberikan banyak manfaat dan juga sebagai bahan acuan dalam pengembangan penelitian ini. Oleh karena itu, penulis mengambil referensi dari jurnal dan penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan dengan topik ini, di antaranya sebagai berikut.

2.2.1 Analisis Perbandingan Kehilangan Gaya Prategang pada Jembatan *Fly Over* Metode *Stressing* Satu Arah dan Dua Arah

Penelitian yang dilakukan oleh Ulandari dkk. (2021) menganalisis mengenai pengaruh penerapan metode *stressing* satu arah dan dua arah terhadap besarnya kehilangan gaya prategang pada jembatan *fly over*. Penelitian ini bertujuan membandingkan kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *Girder* PCI akibat penggunaan kedua metode *stressing* tersebut, serta menganalisis dampaknya terhadap distribusi tegangan dan lendutan pada struktur jembatan.

Metode penelitian ini dilakukan perhitungan gaya prategang beserta kehilangan gaya prategang yang terjadi akibat penggunaan metode *stressing* satu

arah dan dua arah. Kehilangan gaya prategang dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti perpendekan elastis beton, gesekan pada beton, slip ankur, rangkai dan susut beton, serta relaksasi baja. Perhitungan faktor-faktor tersebut mengacu pada rumus standar yang terdapat dalam buku *Desain Struktur Beton Prategang* oleh Lin.Y.T & Burns (1988) serta ketentuan SNI 1725:2016.

Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan metode *stressing* satu arah menyebabkan kehilangan gaya prategang yang relatif lebih besar dibandingkan metode *stressing* dua arah. Pada metode *stressing* satu arah, kehilangan gaya prategang sebesar 26,696%, sedangkan pada metode *stressing* dua arah sebesar 28,764%. Setelah dilakukan peningkatan tegangan awal presentase kehilangan gaya prategang mengalami penurunan. Kehilangan gaya prategang pada metode *stressing* satu arah berkurang menjadi 17,778% sementara metode *stressing* dua arah menjadi 17,994%.

2.2.2 Studi Alternatif *Loss of Prestress* PCI Girder Akibat Metode *Single*

Stressing dan *Double Stressing* pada *Section Overpass* STA 52+174 Jalan Tol Balikpapan-Samarinda

Dalam studi yang dilakukan oleh Jepriani dkk. (2022) mengkaji besarnya kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *Girder* PCI dalam pembangunan jembatan *fly over*. Fokus penelitian ini adalah membandingkan kehilangan gaya prategang akibat penerapan metode *stressing* satu arah dan dua arah, sekaligus meninjau pengaruh perbedaan panjang bentang girder terhadap total kehilangan gaya prategang yang terjadi.

Pada penelitian ini diterapkan dua jenis metode *stressing*, yaitu *single stressing* dan *double stressing*, pada *Girder* PCI dengan panjang bentang 25,80 m dan 16,80 m. Analisis dilakukan melalui perhitungan gaya prategang serta berbagai komponen kehilangan gaya prategang yang dipengaruhi oleh perpendekan elastis beton, gesekan tendon, slip ankur, rangkai dan susut beton, serta relaksasi baja. Perhitungan tersebut digunakan untuk menilai kondisi tegangan dan lendutan pada girder dengan mengacu pada ketentuan SNI 1725:2016.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *single stressing* menghasilkan kehilangan gaya prategang yang lebih besar dibandingkan *double stressing*. Pada

girder dengan bentang 25,80 m, kehilangan gaya prategang *single stressing* sebesar 25,30%, sedangkan pada bentang 16,80 m mencapai 27,18%. *Double stressing* menghasilkan kehilangan gaya prategang yang lebih rendah, yaitu 17,22% pada bentang 25,8 m dan 24,12% pada bentang 16,80 m. Selain itu, girder dengan bentang yang lebih panjang menunjukkan kehilangan gaya prategang yang relatif lebih kecil dibandingkan *girder* dengan bentang yang lebih pendek.

2.2.3 Analisis Kehilangan Gaya Prategang Girder pada Jembatan Proyek

Pembangunan Jalan Tol Tebing Tinggi-Inderapura

Penelitian yang dilakukan oleh Sari dkk. (2022) membahas mengenai kehilangan gaya prategang *girder* pada jembatan, yang bertujuan untuk mengetahui presentase kehilangan gaya prategang yang terjadi pada girder jembatan Jalan Tol Tebing Tinggi-Inderapura. Kehilangan gaya prategang dalam struktur beton prategang harus diperhitungkan dengan baik untuk memastikan bahwa nilai tersebut tidak melebihi batas yang diizinkan dalam perencanaan.

Metode penelitian dilakukan dengan mengumpulkan data lapangan dari proyek pembangunan jalan tol, khususnya pada girder tipe PCI. Analisis kehilangan gaya prategang mencakup kehilangan jangka pendek dan kehilangan jangka panjang. Seluruh tahapan perhitungan dilakukan berdasarkan teori beton prategang dan mengacu pada pedoman perhitungan yang terdapat dalam buku Lin.Y.T & Burns (1988)

Hasil analisis menunjukkan bahwa total kehilangan gaya prategang yang terjadi pada girder jembatan sebesar 21,62%. nilai tersebut masih berada di bawah batas maksimum kehilangan gaya prategang yang diizinkan, yaitu sebesar 25%, berdasarkan hasil perhitungan gaya prategang rata-rata (P_e/A_c) sebesar 8,98 Mpa. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kehilangan gaya prategang pada girder jembatan dalam proyek ini masih dalam kondisi aman dan struktur jembatan memenuhi persyaratan keselamatan.

2.2.4 Perencanaan Alternatif Tendon Prategang dengan Variasi Tata Letak Tendon dan Mutu Tendon pada Struktur Atas Jembatan

Digo & Juliafad (2023) melakukan studi tentang perencanaan alternatif tendon prategang dengan menguji variasi posisi dan mutu tendon pada struktur

jembatan Batang Lasi di Kota Sawahlunto. Penelitian ini bertujuan untuk menilai baik PCI *Girder* dapat menahan gaya yang diterapkan serta mengeksplorasi bagaimana variasi mutu penggunaan dua jenis tendon, yakni *strands 7 wire* ASTM A416 *grade 250 low relaxation* dan *strands 7 wire* ASTM A779 *grade 270*, yang diterapkan pada jembatan dengan bentang sepanjang 60 m. Acuan 2847:2013.

Berdasarkan hasil analisis, tendon *strands 7 wire* ASTM A416 *grade 250 low relaxation* menghasilkan kehilangan gaya prategang kecil, terutama pada faktor gesekan angkur, pemendekan elastis, relaksasi tendon, dan gaya prategang efektif. *Strands 7 wire* ASTM A416 *grade 250 low relaxation* terbukti lebih efisien dalam menahan beban dan menghasilkan kehilangan gaya prategang yang lebih kecil, menjadikannya pilihan yang lebih baik untuk jembatan beton prategang.

2.2.5 Kajian Analisis Struktur PCI *Girder Prestressed* pada Jembatan Bentang 35,8 meter

Penelitian yang dilakukan oleh Kautsar Darojatun & Nuranita (2024) membahas analisis struktur PCI *Girder* prategang pada jembatan dengan bentang 35,8 meter. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi tegangan dan lendutan pada penampang Girder PCI, serta memeriksa apakah tegangan yang terjadi pada struktur memenuhi batas tegangan yang diizinkan. Dalam perhitungan struktur, diketahui bahwa tegangan pada serat bawah girder melebihi batas kapasitas tegangan izin, dengan rasio tegangan 1,000. meskipun demikian, lendutan yang terjadi pada penampang girder telah memenuhi batas lendutan yang diizinkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun terjadi tegangan berlebih pada serat bawah girder, PCI *Girder* masih dapat dipertimbangkan sebagai bahan untuk desain jembatan, karena lendutannya berada dalam batas aman. Penelitian ini menginformasikan bahwa meskipun ada beberapa permasalahan pada tegangan, struktur tersebut tetap dapat memenuhi kriteria kekuatan dan kekakuan yang dibutuhkan perencanaan jembatan SNI 1725:2016.

Perbedaan penelitian sebelumnya dengan penelitian sekarang dapat dibuktikan pada Tabel 2.1 berikut.

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Nama Peneliti, Tahun	Terdahulu					Sekarang
	Ulandari dkk. (2021)	Jepriani dkk. (2022)	Sari dkk. (2022)	Digo & Juliafad (2023)	Kautsar Darojatun B, dkk (2024)	Aulia (2026)
Judul	Analisis Perbandingan Kehilangan Gaya Prategang pada Jembatan <i>Fly Over</i> Metode <i>Stressing</i> Satu arah dan Dua Arah	Studi Alternatif <i>Loss of Prestress</i> PCI Girder Akibat Metode <i>Single Stressing</i> dan <i>Double Stressing</i> pada <i>Section Overpass</i> STA 52+174 Jalan Tol Balikpapan-Samarinda	Analisis Kehilangan Gaya Prategang Girder pada Jembatan Proyek Pembangunan Jalan Tol Tebing Tinggi-Inderapura	Perencanaan Alternatif Tendon Prategang dengan Variasi Tata Letak Tendon dan Mutu Tendon pada Struktur Atas jembatan Batang Lasi Kota Sawahlunto	Kajian Analisis Struktur PCI Girder <i>Prestressed</i> pada Jembatan Bentang 35,8 meter	Analisis Pengaruh Jumlah <i>Strands</i> Terhadap Total Kehilangan Gaya Prategang <i>Stressing</i> pada Balok Beton Prategang Tipe PCI Girder
Tujuan	Mengetahui pengaruh metode <i>stressing</i> pada pekerjaan jembatan <i>fly over</i> terhadap kehilangan gaya prategang dan menganalisa perbedaan kehilangan gaya prategang akibat dua metode pada jenis PCI Girder	Menilai kehilangan gaya prategang dengan menggunakan metode <i>single stressing</i> dan <i>double stressing</i> , dan mengetahui pengaruh panjang bentang girder terhadap kehilangan prategang	Mengetahui besarnya presentase kehilangan gaya prategang, dan untuk menghitung faktor-faktor kehilangan gaya prategang	Mengetahui kemampuan PCI <i>Girder</i> dalam memikul gaya-gaya yang bekerja pada jembatan, serta menganalisis pengaruh variasi mutu tendon dan tata letak tendon terhadap kehilangan gaya prategang	Menganalisis struktur PCI <i>Girder prestressed</i> pada jembatan bentang 35,8 meter, dengan focus pada perhitungan tegangan lendutan dengan nilai izin yang ditentukan	Menganalisis pengaruh jumlah <i>strands</i> terhadap total kehilangan gaya prategang pada balok tipe PCI Girder dan mengidentifikasi parameter yang paling dipengaruhi oleh jumlah <i>strands</i>
Metode dan Acuan	Metode <i>stressing</i> satu arah dan dua arah.	Metode <i>single stressing</i> dan <i>double stressing</i>	Metode kehilangan prategang	SNI 2847:2013 <i>Strand 7 Wire</i> ASTM A416	SNI 1725:2016	SNI 1725:2016 G Nawy T.Y.Lin dan Burns

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dan Sekarang

Nama Peneliti, Tahun	Terdahulu					Sekarang
	Ulandari dkk. (2021)	Jepriani dkk. (2022)	Sari dkk. (2022)	Digo & Juliafad (2023)	Kautsar Darojatun B, dkk (2024)	Aulia (2026)
Metode dan Acuan	SNI 1725:2016 dan SNI 2847:2013	SNI 1725:2016	Jangka pendek dan jangka panjang. T.Y.Lin & Burns	<i>Grade 250 low relaxation, Strand 7 wire ASTM A779 grade 270</i>	SNI 1725:2016	SNI 1725:2016 G Nawy T.Y.Lin dan Burns
Hasil	Menghasilkan <i>stressing</i> satu arah kehilangan gaya prategang 29,696%, dua arah 28,764%. Setelah peningkatan awal turun menjadi 17,778% dan 17,994%	<i>Single stressing</i> menyebabkan kehilangan gaya prategang lebih besar. Pada bentang 25,80 m: 25,03% (<i>single</i>) dan 17,22% (<i>double</i>). Pada bentang 16,80 m: 27,18% (<i>single</i>) dan 24,12% (<i>double</i>). Bentang lebih panjang, kehilangan lebih kecil	Total kehilangan prategang sebesar 21,62%, yang lebih kecil dari batas maksimal yang diizinkan yaitu 25%. Kehilangan terbesar disebabkan oleh gesekan tendon dan perpendekan elastis beton.	<i>Strand 7 wire</i> ASTM A416 grade 250 memiliki kehilangan gaya prategang terkecil akibat gesekan ankur dan relaksasi, sementara ASTM A779 grade 270 terkecil akibat gesekan tendon	Kondisi awal dan setelah <i>loss of prestress</i> , rasio tegangan terhadap tegangan izin pada serat atas girder tidak melebihi batas izin, pada serat bawah rasio teganagan mencapai 1,000	Variasi jumlah <i>strands</i> meningkatkan kehilangan gaya prategang dari 23,9% pada 46 <i>strands</i> menjadi 28,6% pada 62 <i>strands</i> , dengan kenaikan rata-rata 1,1% tiap penambahan satu <i>strands</i> . Faktor terbesar yaitu <i>elastic shortening</i> , diikuti <i>anchoring</i> dan <i>relaxation of tendon</i>

2.3 Keaslian Penelitian

Penelitian tentang struktur beton prategang, khususnya pada elemen jembatan jenis PCI Girder, telah banyak diteliti oleh para peneliti sebelumnya dengan berbagai metode dan tujuan. Berdasarkan analisis terhadap beberapa studi sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa setiap penelitian memiliki titik fokus yang bervariasi. Berbeda dari penelitian sebelumnya, penelitian sekarang berfokus untuk menganalisis lebih lanjut hubungan antara jumlah *strands* terhadap masing-masing faktor penyebab kehilangan seperti *anchorage friction*, *jack friction*, *elastic shortening*, *anchoring* dan *relaxation of tendon*, serta mengidentifikasi parameter mana yang memiliki pengaruh terbesar.

Berikut beberapa perbedaan penelitian sekarang dengan penelitian terdahulu:

1. Objek penelitian yang sekarang berlokasi di proyek Jalan Tol Yogyakarta-Bawen paket 1 seksi 1.
2. Menggunakan data asli lapangan, yang kemudian akan dibandingkan dengan perhitungan analisis kuantitatif dengan menggunakan *Microsoft Excel*.
3. Pada penelitian sekarang tidak dilakukan variasi tata letak tendon, tetapi variasi mengenai jumlah *strands*.

Berikut beberapa persamaan penelitian sekarang dengan penelitian terdahulu:

1. Berfokus pada analisis struktur beton prategang, khususnya pada balok tipe PCI Girder.
2. Menganalisis kehilangan gaya prategang yang memengaruhi kinerja balok beton prategang.
3. Menggunakan standar dan acuan SNI 1725:2016, Nawy (2001), dan Lin.Y.T & Burns (1988).

Keaslian dari penelitian ini terletak pada analisis hubungan antara jumlah *strands* dan kehilangan gaya prategang, serta pengaruh faktor-faktor seperti *anchorage friction*, *jack friction*, *elastic shortening*, *anchoring* dan *relaxation of tendon*. Penelitian difokuskan pada balok prategang tipe PCI Girder dengan perhitungan yang mengacu pada SNI 1725:2016 dan referensi Nawy (2001) serta Lin.Y.T & Burns (1988).

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Tinjauan Umum

Pada bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk analisis pengaruh jumlah *strands* terhadap total kehilangan gaya prategang pada balok beton prategang tipe PCI Girder. Teori yang digunakan berdasarkan hasil referensi dari buku, jurnal, dan penelitian Tugas Akhir sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan penelitian sekarang.

3.2 Pengertian Jembatan

Jembatan adalah bangunan sipil yang menghubungkan dua tempat yang terpisah oleh penghalang alami atau buatan seperti sungai, lembah, jalan raya, atau rel kereta api. Fungsi utama dari jembatan adalah untuk menyediakan jalur transportasi yang aman dan efisien, baik untuk kendaraan maupun pejalan kaki. Menurut RSNI T-12-2004 Badan Standardisasi Nasional (2004).

3.2.1 Struktur Jembatan

SNI 1725:2016 (Badan Standarisasi Nasional) menyatakan bahwa jembatan terdiri dari dua komponen utama. Struktur atas, juga dikenal sebagai (superstruktur) dan struktur bawah (substruktur). Struktur atas menanggung beban lalu lintas langsung dan menyalurkannya ke struktur bawah. Dari sana, beban tersebut kemudian didistribusikan ke pondasi dan tanah di bawahnya.

Struktur atas atau supestruktur adalah bagian yang langsung menahan beban lalu lintas yang disebabkan oleh kendaraan, pejalan kaki, dan fenomena alam seperti angin dan gempa. Elemen utama dalam struktur atas adalah balok (*girder*), pelat lantai, dan jembatan pelintas.

Struktur bawah (substruktur) terdiri dari pondasi, abutment, dan pilar, yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur atas pondasi. Pilar menahan beban girder, sementara abutment menopang ujung girder dan menghubungkan ke tanah.

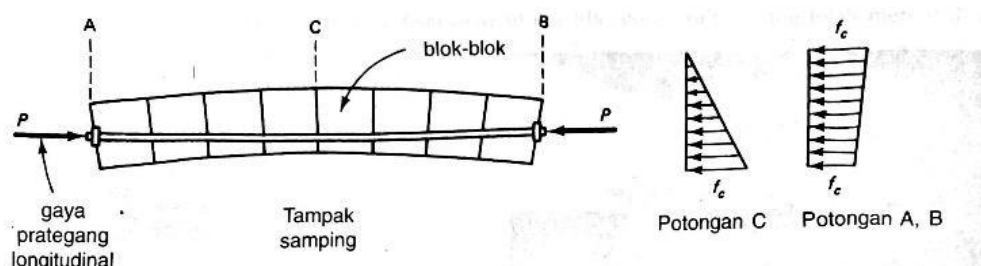
3.3 Beton Prategang

Dalam bukunya menjelaskan beton prategang adalah jenis beton yang menggunakan tulangan baja yang ditegangkan sebelum beton menerima beban eksternal. Penegangan baja tulangan (tendon) ini dilakukan dengan menariknya, sehingga beton berada dalam kondisi tekan saat mengeras Nawy (2001). Hal ini memberikan keuntungan pada beton karena beton lebih kuat terhadap tekanan dan lebih lemah terhadap tarik. Dengan adanya tegangan tekan yang diberikan oleh tendon, beton dapat menahan gaya tarik yang terjadi selama pemakaian struktur. Beton prategang ini sangat efektif untuk mengurangi lendutan dan meningkatkan kapasitas beban, sehingga sering digunakan pada struktur jembatan dan bangunan dengan bentang panjang. Dengan cara ini, beton prategang menjadi lebih tahan terhadap retakan dan mampu mendukung beban yang lebih besar.

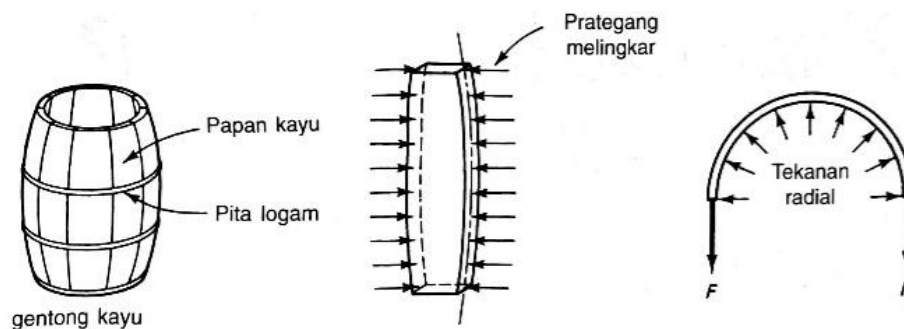
3.3.1 Gaya Prategang

Gaya prategang merupakan gaya tekan yang diterapkan sebelum beban bekerja di sepanjang bentang elemen struktural, yang menghasilkan prinsip prategang atau disebut prategang linier. Gaya ini diberikan secara longitudinal atau sejajar sepanjang bentang. Tegangan melingkar pada struktur silindris memiliki prinsip yang serupa dengan prategang linier, yaitu berfungsi untuk menetralkan tegangan tarik di serat terluar yang timbul akibat tekanan internal.

Gambar 3.1 dan 3.2 berikut menunjukkan aksi pemberian prategang dari kedua jenis penampang dan reaksi atau respon yang dihasilkan Nawy (2001).



Gambar 3.1 Beton Prategang Pada Balok Beton



Gambar 3.2 Pemberian Prategang Melingkar
(Sumber: Nawy (2001))

Gambar di atas menunjukkan cara dasar pemberian prategang pada dua jenis sistem struktural dan respons tegangan yang ditimbulkan. Pada Gambar 3.1, blok-blok beton bekerja bersama sebagai balok karena adanya gaya prategang tekan P yang besar. Meskipun blok-blok ini bisa saja tergelincir atau mengalami kegagalan geser vertikal, hal tersebut tidak terjadi akibat adanya gaya longitudinal P . Begitu juga pada Gambar 3.2, papan-papan kayu terlihat bisa terpisah akibat tekanan radial internal yang bekerja padanya. Namun, berkat pemberian prategang tekan melalui pita logam yang berfungsi sebagai prategang melingkar, papan-papan tersebut tetap saling terhubung.

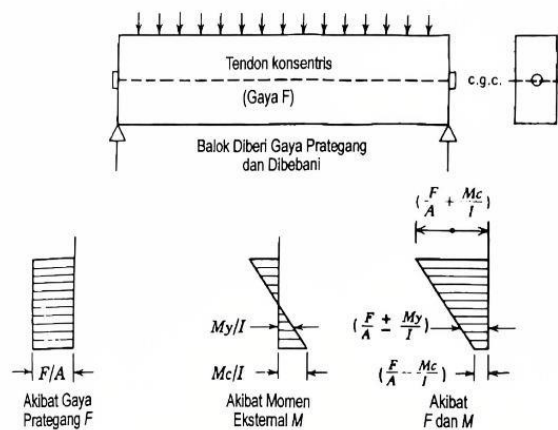
3.3.2 Konsep Dasar Beton Prategang

Hubungan tegangan-regangan dan prinsip mekanika menentukan gaya prategang yang digunakan pada suatu struktur untuk memenuhi beban dan kondisi tertentu. Gaya longitudinal yang sejajar dengan sumbu struktur diberikan baik sebelum maupun setelah beton dicor untuk memberikan gaya prategang linier. Gaya tekan pada tendon prategang membantu menahan gaya tarik karena beton tidak dapat menahan gaya tarik tersebut. Gaya prategang dihasilkan ketika tendon, komponen struktur beton direntangkan. Tendon biasanya terbuat dari bahan yang memiliki kekuatan tarik tinggi, seperti batang baja, kawat, atau untaian kawat.

Terdapat 3 konsep utama yang dapat digunakan untuk menjelaskan dan menganalisis sifat dasar beton prategang.

1. Sistem Prategang untuk Mengubah Beton Menjadi Bahan yang Elastis

Beton prategang pada dasarnya adalah beton yang diubah dari bahan yang rapuh menjadi lebih elastis dengan cara memberikan tekanan. Beton, yang umumnya tidak mampu menahan tarikan dan kuat menahan beban tekan, diberikan gaya tekan melalu baja mutu tinggi yang ditarik. Sehingga beton yang awalnya getas dapat menahan tegangan tarik akibat beban eksternal yang ditimbulkan dari tekanan internal Lin.Y.T & Burns (1988). Dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut.



Gambar 3.3 Distribusi Tegangan Beton Prategang

Akibat gaya prategang F yang diterapkan pada titik berat penampang beton, timbul tegangan tekan di seluruh penampang beton yang besarnya adalah F/A , dimana A adalah luas penampang beton. Beban yang tersebar merata sepanjang bentang menyebabkan tegangan tarik di bagian bawah garis netral dan tegangan desak di bagian atas garis netral. Berikut adalah persamaan untuk tegangan lentur

$$F = \frac{Mc}{I} \quad (3.1)$$

Dalam hal ini, F merupakan gaya yang bekerja, M adalah momen lentur pada penampang, c adalah jarak dari serat terluar penampang ke garis netral, dan I

adalah momen inersia penampang. Tegangan maksimum pada serat terluar terjadi ketika tegangan akibat gaya prategang dan tegangan lentur dijumlahkan. Berikut adalah rumus untuk menghitung tegangan maksimum pada serat terluar penampang.

Tegangan di atas garis netral tidak boleh melebihi batas tegangan hancur beton.

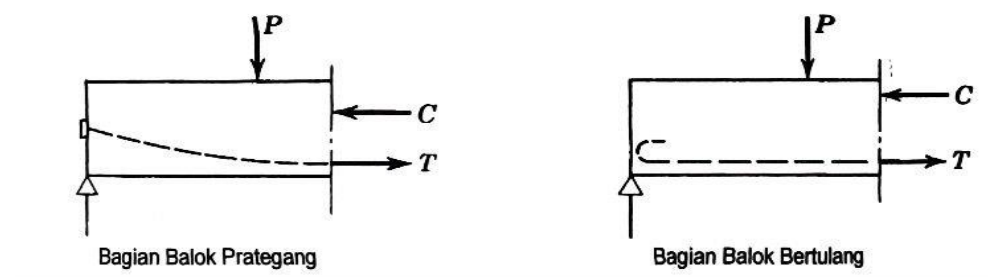
$$F_{total} = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (3.2)$$

Di bawah garis netral.

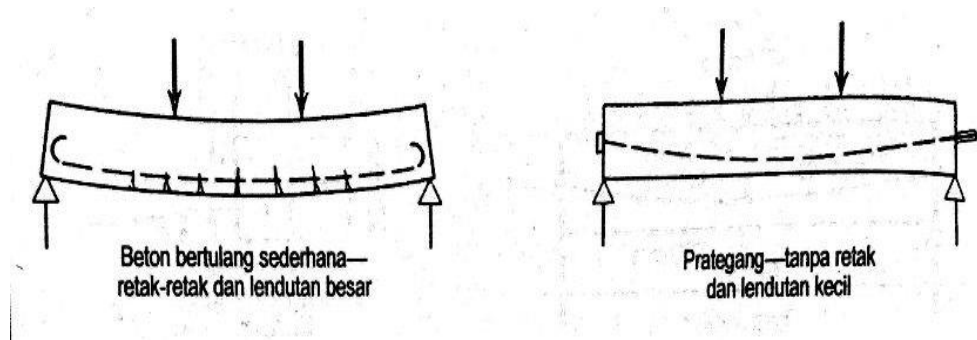
$$F_{total} = \frac{P}{A} - \frac{Mc}{I} > 0 \quad (3.3)$$

2. Sistem Prategang untuk Kombinasi Baja Mutu Tinggi dengan Beton

Kombinasi antara mutu beton yang tinggi dan mutu baja yang tinggi menciptakan kondisi di mana beton berfungsi untuk menahan gaya desak, sementara baja menahan gaya tarik. Kombinasi ini menghasilkan struktur yang lebih aman dan ekonomis dibandingkan dengan struktur beton bertulang konvensional. Hal ini disebabkan karena beton dengan mutu tinggi dan baja mutu tinggi mampu menahan momen eksternal dengan lebih baik. Perbedaan antara beton prategang dan beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 3.4 dan 3.5 berikut Lin.Y.T & Burns (1988)



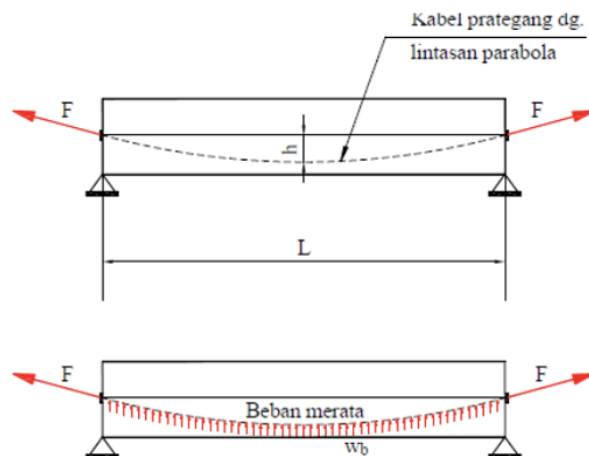
Gambar 3.4 Momen Penahan Internal Pada Beton Prategang dan Beton Bertulang



Gambar 3.5 Balok Beton Menggunakan Baja Mutu Tinggi

3. Sistem Prategang untuk Mencapai Keseimbangan Beban

Usaha untuk menghasilkan keseimbangan gaya pada suatu struktur dikenal sebagai sistem prategang untuk mencapai keseimbangan beban. Karena prategang mempengaruhi keseimbangan berat sendiri, struktur beton lentur, tetapi tidak mengalami tegangan lentur selama pembebanan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.6 berikut Lin.Y.T & Burns (1988).



Gambar 3.6 Beton Prategang

Balok sederhana yang diberi gaya prategang F melalui kabel prategang dengan lintasan parabola menghasilkan distribusi beban yang merata ke atas. Berikut adalah persamaannya.

$$Wb = \frac{8 F h}{L^2} \quad (3.4)$$

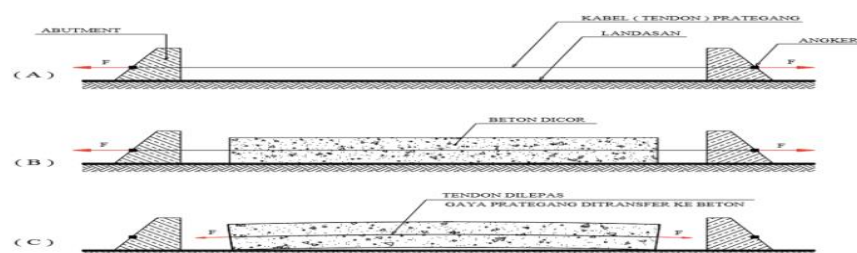
Di mana Wb merupakan beban merata yang diakibatkan oleh gaya prategang F , F adalah gaya prategang itu sendiri, h adalah tinggi lintasan parabola, dan L adalah panjang balok. Keseimbangan beban pada suatu struktur dapat diterapkan pada struktur statis tak tentu, seperti pelat datar dengan bentang menerus. Hal ini disebabkan oleh prinsip keseimbangan beban yang menerapkan penegangan dua arah, yang menghasilkan distribusi tegangan yang merata.

3.3.3 Metode Prategang

Metode prategang adalah suatu teknik yang diterapkan untuk memperkuat struktur beton dengan memberikan gaya tekan pada elemen struktur sebelum beban eksternal bekerja. Dengan cara ini, tegangan pada struktur dapat didistribusikan lebih merata, sehingga meningkatkan efisiensi dan mengurangi risiko kerusakan. Dalam penarikan baja prategang, terdapat dua metode utama yang digunakan, yaitu metode pratarik (*pre-tension method*) dan pascatarik (*post-tension method*) Tumpu & Rusan Rangan (2020).

1. Pratarik (*Pre-tension method*)

Pratarik (*Pre-tension method*) adalah sistem penarikan baja prategang yang diterapkan dengan memberikan gaya prategang terlebih dahulu sebelum proses pengecoran dilakukan. Dalam sistem ini, beton diberi gaya prategang, dan tendon ditarik untuk menegangkan baja sebelum pengecoran dilakukan pada bekisting yang telah dipersiapkan. Prinsip dari metode pratarik ini dapat dilihat pada Gambar 3.7 berikut.

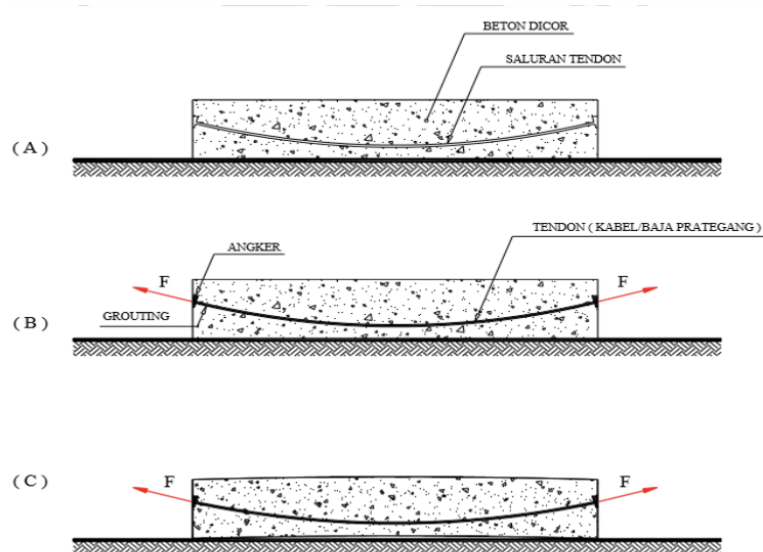


Gambar 3.7 Beton Prategang Pratarik

Pada gambar di atas, tendon diberi gaya prategang dan kemudian diangkur pada kedua abutment tetap. Setelah itu, beton dicor pada bekisting yang telah disiapkan hingga melingkupi tendon yang telah diberi gaya prategang, lalu dibiarkan mengering. Setelah beton mencapai kekuatan yang cukup untuk menahan gaya prategang, tendon akan dipotong dan dilepas. Begitu tendon dilepas, gaya prategang akan diteruskan ke beton, dan sebelum menerima beban, beton akan melengkung ke atas. Ketika beban diterapkan, balok akan kembali datar seperti semula.

2. Pascatarik (*Post-tension method*)

Pascatarik (*post-tension method*) adalah sistem penarikan baja prategang yang diterapkan setelah beton dicor dan mencapai tingkat kekerasan yang cukup untuk menahan tegangan sesuai dengan perencanaan. Prinsip dari metode pascatarik ini dapat dilihat pada Gambar 3.8 berikut.



Gambar 3.8 Beton Prategang Pascatarik

Pada gambar di atas, langkah pertama adalah menyiapkan bekisting untuk pengecoran, yang dilengkapi dengan saluran untuk kabel prategang yang dipasang sesuai dengan rencana beton yang akan dicor. Setelah pengecoran selesai dan beton cukup kuat untuk menahan gaya prategang, kabel prategang

dimasukkan ke dalam saluran tersebut. Kabel kemudian ditarik untuk menghasilkan gaya prategang. Penarikan kabel dapat dilakukan dengan menarik kedua ujungnya secara bersamaan dan mengakurnya pada waktu yang sama, atau dengan menarik salah satu ujungnya sementara ujung lainnya diangkur. Setelah proses pengangkuran, dilakukan grouting melalui lubang yang tersedia. Beton akan tertekan setelah pengangkuran, dan gaya prategang akan ditransfer ke beton. Akibatnya, balok beton akan melengkung ke atas karena tendon yang dipasang melengkung dan memberikan beban merata pada balok tersebut.

3.3.4 Keuntungan dan Kekurangan Beton Prategang

Beton prategang memiliki sejumlah keuntungan yang menjadikannya pilihan populer dalam konstruksi. Namun, seperti halnya material lainnya, beton prategang juga memiliki kekurangan Arga Rumbyarso (2024). Berikut adalah keuntungan dan kekurangan beton prategang.

Keuntungan beton prategang, sebagai berikut:

1. Seluruh penampang beton prategang menjadi efektif, sedangkan pada beton bertulang biasa hanya diatas garis netral saja yang efektif.
2. Struktur beton prategang lebih ramping.
3. Struktur beton prategang tidak retak akibat beban kerja.
4. Lendutan yang lebih kecil.
5. Daya tahan terhadap karat lebih baik.
6. Penggunaan bahan yang lebih sedikit karena menggunakan bahan mutu tinggi.

Kekurangan beton prategang, sebagai berikut:

1. Diperlukan kontrol yang lebih ketat dalam proses pembuatan.
2. Kehilangan tegangan pada pemberian gaya prategang awal.
3. Diperlukan biaya tambahan untuk pengangkutan.

3.4 Baja Prategang

Baja prategang, menurut Nawy (2001), adalah baja yang digunakan dalam beton prategang, dimana baja tersebut ditarik dengan gaya tertentu sebelum beton dituangkan. Setelah beton mengeras dan cukup kuat untuk menahan gaya yang

diberikan, baja prategang akan berfungsi untuk menyeimbangkan tegangan tarik yang terjadi pada beton.

3.4.1 Jenis Baja Prategang

Baja prategang dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan cara pemasangan dan proses penarikannya. Setiap jenis baja prategang memiliki karakteristik yang berbeda, sesuai dengan kebutuhan struktural dan desain konstruksi. Pada beton prategang, baja yang digunakan sebagai pemberi prategang memiliki mutu yang sangat tinggi, mencapai 270.000 psi (1862 MPa) atau bahkan lebih. Baja dengan mutu seperti ini mampu menahan gaya prategang yang diperlukan. Kehilangan prategang yang biasa terjadi diperkirakan berada dalam rentang 241 hingga 414 MPa. Oleh karena itu, prategang awal diterapkan harus tinggi, sekitar 1241 hingga 1517 MPa. Baja prategang ini dapat berbentuk kawat Tunggal, strand yang terdiri dari beberapa kawat yang dipuntir menjadi satu elemen Tunggal, atau batang baja bermutu tinggi.

Terdapat tiga jenis baja (tendon) yang digunakan dalam beton prategang, yaitu:

1. Kawat Tunggal (*wire*)

Kawat Tunggal merupakan jenis baja prategang yang banyak digunakan dalam sistem pratarik (*pretension*). Kawat ini memiliki diameter yang relatif kecil dan dipasang dalam keadaan tegang sebelum beton dicor. Sistem ini memberikan tegangan awal pada beton, yang membantu mengurangi lenturan struktur saat menerima beban. Kawat tunggal umumnya digunakan pada elemen struktur kecil dengan kapasitas beban yang lebih rendah, seperti balok atau pelat beton. Kawat tunggal dapat dilihat pada Gambar 3.9 berikut.



Gambar 3.9 Kawat Tunggal (Wire)

2. Kawat Untaian (*strand*)

Kawat Untaian, atau *strand*, terdiri dari beberapa kawat baja yang dipilin menjadi satu unit. Baja ini lebih sering digunakan dalam sistem pascatarik (*post-tension*), di mana penarikan dilakukan setelah pengecoran beton dan beton sudah cukup keras untuk menahan gaya prategang. *Strand* memiliki ketahanan tarik yang lebih besar dibandingkan kawat tunggal, serta kemampuan untuk mendistribusikan tegangan secara lebih merata. Biasanya digunakan dalam struktur besar seperti jembatan, gedung bertingkat, atau balok besar yang membutuhkan kapasitas beban tinggi dan daya tahan lebih besar terhadap deformasi. Kawat untai dapat dilihat pada Gambar 3.10 berikut.

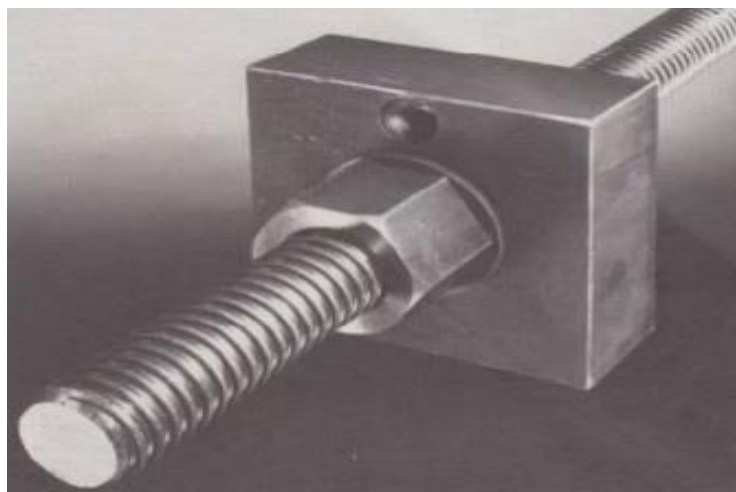


Gambar 3.10 Kawat Untaian (Strands)

3. Kawat Batangan (*bar*)

Kawat Batangan atau batang baja digunakan dalam sistem pratarik (*pretension*) untuk struktur beton prategang. Jenis baja ini lebih besar dan lebih kuat dibandingkan kawat tunggal atau *strand*. Kawat Batangan digunakan untuk elemen struktur yang memerlukan kapasitas tinggi, seperti kolom atau balok tebal. Baja ini dipasang dalam kondisi tertegang sebelum pengecoran beton, dan sangat efektif untuk mentransfer gaya prategang ke

beton, sehingga meningkatkan ketahanan terhadap tegangan tarik. Kawat Batangan dapat dilihat pada Gambar 3.11 berikut.



Gambar 3.11 Kawat Batangan (Bar)

Kawat tunggal yang dipakai untuk beton prategang adalah yang sesuai dengan spesifikasi seperti ASTM A 421. Untaian kawat (*strand*) banyak digunakan untuk beton prategang dengan sistem pascatarik. Untaian kawat yang dipakai harus memenuhi syarat seperti yang terdapat ASTM A 416 yang dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan 3.2 berikut.

Tabel 3.1 Kawat-Kawat untuk Beton Prategang

Diameter Nominal (in)	Kuat tarik minimum (psi)		Tegangan minimum pada ekstensi 1% (psi)	
	Tipe BA	Tipe WA	Tipe BA	Tipe WA
0,192		250.000		212.500
0,196	240.000	250.000	204.000	212.500
0,25	240.000	240.000	204.000	204.000
0,276	235.000	235.000	199.750	199.750

(Sumber: Nawy (2001))

Tabel 3.2 Strand Standar 7 Kawat untuk Beton Prategang

Diameter nominl strand (in)	Kuat patah strand (min, lb)	Luas baja nomimal strand (in.2)	Berat nominal strand (lb/1000 ft)	Beban minimum pada ekstensi 1% (lb)
Mutu 250				
1/4 (0,250)	9.000	0,036	122	7.650
5/16 (0,313)	14.500	0,058	197	12.300
3/8 (0,375)	20.000	0,08	272	17.000
7/16 (0,438)	27.000	0,108	367	23.000
1/2 (0,500)	36.000	0,144	490	30.600
3/5 (0,600)	54.000	0,216	737	45.900
Mutu 270				
3/8 (0,375)	23.000	0,058	290	19.550
7/16 (0,438)	31.000	0,115	390	26.350
1/2 (0,500)	41.300	0,153	520	35.100
3/5 (0,600)	58.600	0,217	740	49.800

(Sumber: Nawy (2001))

3.4.2 Relaksasi

Relaksasi baja merujuk pada kehilangan prategang yang terjadi ketika kawat-kawat mengalami regangan konstan seiring berjalannya waktu. Proses ini mirip dengan rangkai pada beton, namun perbedaannya terletak pada fakta bahwa relaksasi baja menyebabkan penurunan tegangan pada baja, sementara rangkai pada beton berhubungan dengan perubahan regangan Nawy (2001). Besarnya kehilangan tegangan pada baja akibat relaksasi dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$F_{re} = [K_{re} - J(F_{sh} + F_{cr} + F_{es})]C \quad (3.5)$$

Dimana :

F_{re} = Kehilangan tegangan akibat relaksasi baja prategang

K_{re} = Koefisien relaksasi

J = Faktor waktu

C = Faktor relaksasi yang besarnya tergantung pada jenis tendon

F_{sh} = Kehilangan tegangan akibat susut

F_{cs} = Kehilangan tegangan akibat rangkai

F_{es} = Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton

3.4.3 Korosi

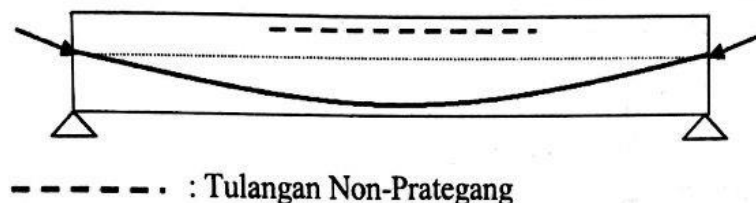
Nawy (2001) perlindungan terhadap korosi pada baja prategang lebih penting dibandingkan pada baja non-prategang. Hal ini disebabkan oleh kenyataan bahwa kekuatan elemen beton prategang sangat bergantung pada gaya prategang, yang pada akhirnya dipengaruhi oleh luas tendon prategang. Penurunan luas baja prategang akibat korosi dapat mengurangi secara signifikan kekuatan momen nominal pada beton prategang.

3.5 Baja Tulangan (Non-Prategang)

Tumpu & Rusan Rangan (2020) penampang beton prategang juga membutuhkan tulangan non-prategang. Tendon berfungsi sebagai elemen utama untuk menahan beban dan mengurangi defleksi, sementara tulangan non-prategang berperan dalam mencegah retakan, meningkatkan kekuatan ultimate, serta memperkuat struktur terhadap beban tak terduga.

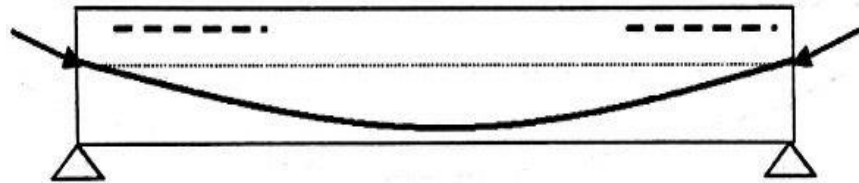
Penggunaan tulangan non-prategang di antaranya adalah:

1. Penahan pada tengah bentang untuk menahan tegangan tarik di sera tatas pada tengah bentang. Dapat dilihat pada Gambar 3.12 berikut.



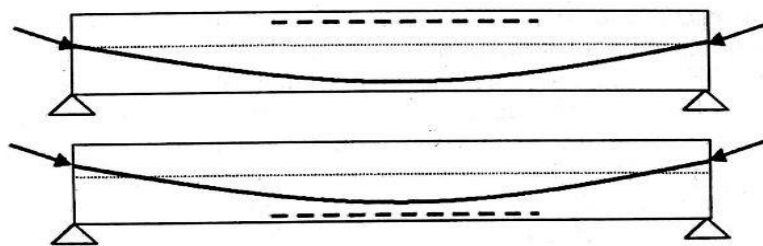
Gambar 3.12 Tulangan Non-Prategang Penahan Tarik di Tengah Bentang

2. Penahan pada tepi bentang untuk menahan tegangan tarik akibat pratekan di tepi bentang. Dapat dilihat pada Gambar 3.13 berikut.



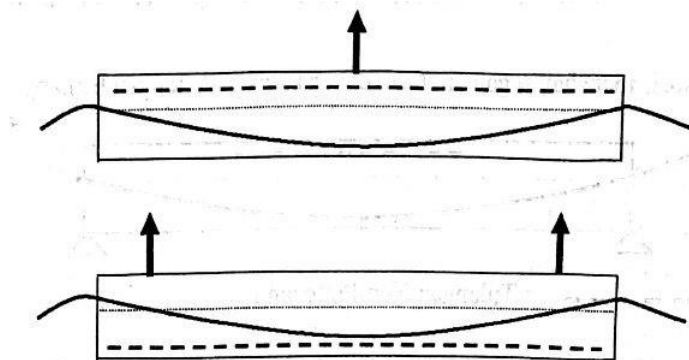
Gambar 3.13 Tulangan Non-Prategang Penahan Tarik di Tepi Bentang

3. Penahan tekan untuk menahan tegangan tekan di dekat tendon jika dimensi beton tidak cukup kuat. Dapat dilihat pada Gambar 3.14 berikut.



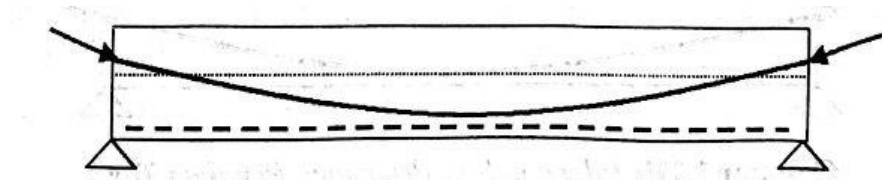
Gambar 3.14 Tulangan Non-Prategang Penahan Tekan

4. Penahan lentur untuk menahan beban lentur selama balok dipindahkan sebelum dilakukan *stressing*. Dapat dilihat pada Gambar 3.15 berikut.



Gambar 3.15 Tulangan Non-Prategang Penahan Lentur

5. Penahan retak untuk menahan retak dan menambah kekuatan penampang setelah retak. Dapat dilihat pada Gambar 3.16 berikut.



Gambar 3.16 Tulangan Non-Prategang Penahan Retak

3.6 Tahap Pembebanan

Beton prategang mengalami beberapa tahap pembebanan. Pada setiap tahap pembebanan harus dilakukan pengecekan atas kondisi serat tertekan dan serat tertarik dari setiap penampang. Pada tahap tersebut berlaku tegangan ijin yang berbeda-beda sesuai kondisi beton dan tendon. Ada dua tahap pembebanan pada beton prategang, yaitu *transfer* dan *service* Supriyadi & Muntohar (2017)

1. Tahap *transfer* adalah tahap pada saat beton sudah mulai mengering dan dilakukan penarikan kabel prategang. Pada saat ini biasanya yang bekerja hanya beban mati struktur, yaitu berat sendiri struktur ditambah beban pekerja dan alat. Pada saat ini beban hidup belum bekerja sehingga momen yang bekerja adalah minimum, sementara gaya yang bekerja adalah maksimum karena belum ada kehilangan gaya prategang.
2. Tahap *service* adalah kondisi pada saat beton prategang digunakan sebagai komponen struktur. Kondisi ini dicapai setelah semua kehilangan gaya prategang dipertimbangkan. Pada tahap ini beban luar seperti beban hidup, angin, gempa dan lain sebagainya mulai bekerja, sedangkan pada tahap ini semua kehilangan gaya prategang sudah harus dipertimbangkan didalam Analisa strukturnya.

3.7 Pembebanan Jembatan

Perhitungan pembebanan jembatan yang diterapkan di Indonesia berpedoman pada SNI 1725:2016 mengenai Pembebanan untuk Jembatan. Dalam tugas akhir ini

digunakan pembebanan menurut SNI 1725:2016. Beban rencana yang diperhitungkan berdasarkan peraturan yang dijelaskan:

3.7.1 Beban Mati

Beban mati adalah beban yang berasal dari struktur itu sendiri, yang meliputi komponen-komponen jembatan beserta semua elemen tambahan yang dianggap bagian tetap dari struktur tersebut. Berat dari setiap komponen struktur dihitung dengan mengalikan massa dengan percepatan gravitasi.

Tabel 3.3 Berat Isi dan Kerapatan Massa untuk Beban Mati

No	Bahan	Berat Isi (KN/m ³)	Kerapatan Masa (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 $f'_c < 35$ Mpa	22,0-25,0	2320
	$35 < f'_c < 105$ Mpa	$22+0,22 f'_c$	$2240+2,29 f'_c$
8	Baja	78,5	7850
9	Kayu ringan	7,8	800
10	Kayu keras	11,0	1125

(Sumber: SNI 1725:2016)

Percepatan gravitasi yang digunakan 9,81 m/detik². Besarnya berat isi dan kecepatan massa sebagaimana diberikan dalam tabel 3.3 diatas. Beban yang termasuk dalam beban mati adalah sebagai berikut:

1. Berat Sendiri

Berat sendiri merujuk pada beban yang berasal dari bagian-bagian struktur serta elemen struktural lainnya. Ini juga mencakup berat bahan dan komponen jembatan, ditambah elemen nonstruktural yang dianggap sebagai bagian tetap. Faktor beban yang digunakan untuk menghitung berat sendiri dapat dilihat pada Tabel 3.4 berikut.

Tabel 3.4 Faktor Beban Berat Sendiri

Tipe Beban	Faktor beban (γ_{MS})			
	Keadaan Batas Layan ($\gamma_{S_{MS}}$)		Keadaan Batas Ultimit ($\gamma_{U_{MS}}$)	
	Bahan		Biasa	Terkurangi
Tetap	Baja	1,00	1,10	0,90
	Alumunium	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

Beban mati tambahan merujuk pada berat bahan yang membentuk beban pada jembatan, yang merupakan elemen nonstruktural, dan nilainya dapat berubah seiring waktu.

Tabel 3.5 Faktor Beban Mati Tambahan

Tipe Beban	Faktor beban (γ_{MA})			
	Keadaan Batas Layan ($\gamma_{S_{MA}}$)		Keadaan Batas Ultimit ($\gamma_{U_{MA}}$)	
	Keadaan		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)

3.7.2 Beban Lalu Lintas

1. Beban Lajur “D” (TD)

Beban lajur “D” merupakan beban yang terdistribusi merata, digabungkan dengan beban garis terpusat. Beban ini memberikan pengaruh pada jembatan yang setara dengan iring-iringan kendaraan nyata. Beban lajur “D” digunakan untuk menghitung struktur elemen di bawah pelat jembatan, dan jumlahnya bergantung pada lebar jalur kendaraan. Faktor beban dapat dilihat pada Tabel 3.6 berikut SNI 1725:2016.

Tabel 3.6 Faktor Beban Lajur “D”

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

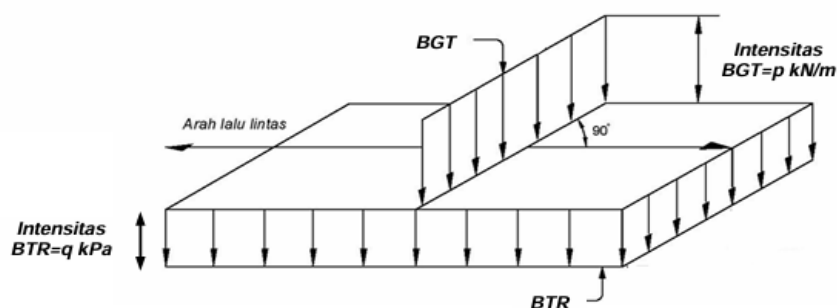
(Sumber: SNI 1725:2016)

Beban terbagi merata dengan besaran intensitas q tergantung pada panjang total yang dibebani dinyatakan dengan rumus sebagai berikut.

$$\text{Jika } L \leq 30 \text{ m ; } q = 9,0 \text{ kPa} \quad (3.9)$$

$$\text{Jika } L > 30 \text{ m ; } q = 9,0(0,5 + \frac{15}{L}) \text{ kPa} \quad (3.10)$$

Yang mana q adalah intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan (kPa) dan L adalah panjang total jembatan yang dibebani (meter). Susunan komponen terbagi merata dan beban garis terpuast dapat dilihat pada Gambar 3.17 berikut SNI 1725:2016.

**Gambar 3.17 Beban Lajur “D”**

Beban garis terpusat (BGT) dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensitas p adalah 49,0 kN/m. untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum

pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi dalam arah melintang jembatan pada bentang lainnya.

Distribusi beban “D” harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga menimbulkan momen maksimum. Hal tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan beban “D” harus diletakkan di seluruh jalur dengan intensitas 100% sepanjang bentang terbebani.

2. Beban Truk “T”

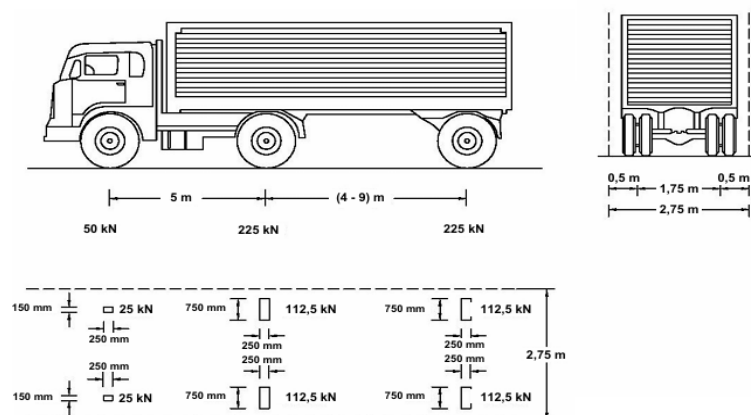
Selain beban “D”, terdapat beban lalu lintas lainnya yaitu beban truk “T”. beban truk “T” tidak dapat digunakan bersamaan dengan beban “D”. Beban truk dapat digunakan untuk perhitungan struktur lantai. Adapun faktor beban untuk beban “T” seperti terlihat pada Tabel 3.7 berikut SNI 1725:2016.

Tabel 3.7 Faktor Beban untuk Beban “T”

Tipe beban	Jembatan	Faktor beban	
		Keadaan Batas Layan (γS_{TT})	Keadaan Batas Ultimit (γU_{TT})
Transien	Beton	1,00	1,80
	Boks Girder Baja	1,00	2,00

(Sumber: SNI 1725:2016)

Pembebanan truk dapat dilihat pada Gambar 3.18 berikut.



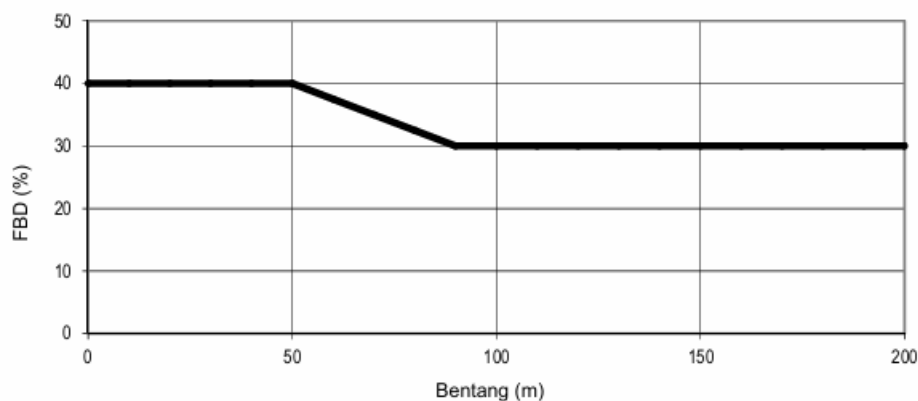
Gambar 3.18 Pembebanan Truk “T” (500 kN)

(Sumber: SNI 1725:2016)

Pembebanan truk “T” terdiri atas kendaraan truk *semi-trailer* yang mempunyai susunan dan berat gandar seperti terlihat dalam Gambar 3.19 diatas. Berat dari tiap-tiap gandar disebarkan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 gandar tersebut bisa diubah-ubah dari 4,0 m sampai dengan 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.

3. Faktor beban dinamis (FBD)

Faktor beban dinamis (FBD) merupakan hasil interaksi antara kendaraan yang bergerak dan jembatan besarnya FBD tergantung pada frekuensi dasar dari suspensi kendaraan, biasanya antara 2 Hz sampai 5 Hz untuk kendaraan berat, dan frekuensi dari getaran lentur jembatan. Untuk perencanaan, FBD dinyatakan sebagai beban statik ekuivalen. FBD digunakan pada keadaan batas ultimit dan batas layan. Nilai FBD dapat dilihat pada Gambar 3.19 berikut SNI 1725:2016.



Gambar 3.19 Faktor Beban Dinamis

4. Gaya rem

Gaya rem harus diambil yang terbesar dari:

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

Gaya rem tersebut harus ditempatkan di semua lajur rencana yang dimuati.

Gaya ini harus diasumsikan untuk bekerja secara horizontal pada jarak 1800

mm diatas permukaan jalan pada masing-masing arah longitudinal dan dipilih yang paling menentukan. Untuk jembatan yang dimasa depan akan dirubah menjadi satu arah, maka semua lajur rencana harus dibebani secara simultan pada saat menghitung besarnya gaya rem.

3.7.3 Beban Lingkungan

Aksi lingkungan mencakup pengaruh suhu, angin, banjir, gempa, dan faktor alamiah lainnya. Besaran beban rencana yang tercantum dalam standar ini dihitung berdasarkan analisis statistik dari kejadian-kejadian umum yang tercatat, tanpa mempertimbangkan faktor khusus yang dapat memperbesar pengaruh lokal. Perencana bertanggung jawab untuk mengidentifikasi kejadian-kejadian khusus di lokasi dan harus memperhitungkannya dalam perencanaan.

1. Beban Angin

Berdasarkan SNI 1725:2016, beban angin pada arah horizontal (tekanan angin horizontal) sebaiknya diperhitungkan pada struktur, mencakup gaya angin yang bekerja pada struktur bagian atas, bawah, serta pada kendaraan. Namun, dalam analisis ini, hanya beban angin pada kendaraan yang dipertimbangkan.

a. Beban Angin pada Kendaraan (EW_1)

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

Tabel 3.8 Komponen Beban Angin yang Bekerja pada Kendaraan

Sudut	Komponen tegak lurus	Komponen sejajar
Derajat	N/mm	N/mm
0	1,46	0,00
15	1,28	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55

(Sumber: SNI 1725:2016)

3.7.4 Beban Gempa

Jembatan harus direncanakan agar memiliki kemungkinan kecil untuk runtuh namun dapat mengalami kerusakan yang signifikan dan gangguan terhadap pelayanan akibat gempa. Penggantian struktur secara parsial atau total mungkin diperlukan. Pihak yang berwenang juga dapat menetapkan kinerja yang lebih tinggi, seperti kinerja operasional. Beban gempa dihitung sebagai gaya horizontal, yang diperoleh dengan mengalikan koefisien respons elastic (C_{sm}) dengan berat struktur ekuivalen, kemudian dimodifikasi dengan faktor modifikasi respons (R_d), dengan rumus sebagai berikut:

$$E_Q = \frac{C_{sm}}{R_d} \times W_t \quad (3.11)$$

Yang mana E_Q adalah gaya gempa horizontal statis (kN), C_{sm} adalah koefisien respons gempa elastis, R_d adalah faktor modifikasi respons, dan W_t adalah berat total struktur terdiri dari beban mati dan beban hidup yang sesuai (kN). Koefisien respon elastik C_{sm} diperoleh dari peta percepatan batuan dasar dan spektra percepatan sesuai dengan daerah gempa dan periode ulang gempa rencana.

3.7.5 Kombinasi Pembebanan

Kombinasi beban dilakukan setelah melakukan analisis terhadap gaya-gaya yang bekerja pada jembatan, di mana setiap beban yang teridentifikasi perlu dihitung dalam kombinasi pembebanan dan dikalikan dengan faktor beban yang sesuai. Hasil perkalian dari masing-masing beban dijumlahkan sesuai dengan

Persamaan 1 pada SNI 1725:2016 dan kemudian dikalikan dengan faktor pengubah tercantum dalam Pasal 5. Faktor beban untuk kombinasi pembebanan ditentukan berdasarkan Tabel 1 Kombinasi Beban dan Faktor Beban pada SNI 1725:2016, halaman 11 dari 67. Pemilihan faktor beban harus mempertimbangkan kondisi ekstrem yang dihasilkan oleh gaya yang bekerja. Jika dalam kombinasi beban terdapat gaya yang mengurangi efek dari gaya lainnya, maka faktor beban yang berkurang digunakan untuk gaya pereduksi. Sedangkan untuk beban permanen, faktor beban yang dipilih harus menghasilkan kombinasi pembebanan pada kondisi kritis. Apabila beban permanen dapat meningkatkan stabilitas, maka faktor beban berkurang harus diperhitungkan.

3.8 Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang merujuk pada penurunan gaya yang bekerja pada tendon gelagar prategang selama setiap tahap pembebanan. Penurunan ini disebabkan oleh sistem penegangan serta pengaruh waktu. Terdapat dua tahapan yang umumnya diperiksa untuk memahami tegangan dan perilaku yang akan terjadi pada tendon prategang Lin.Y.T & Burns (1988) yaitu:

Tahap pertama (kehilangan tegangan akibat penegangan) terjadi setelah gaya prategang diteruskan ke penampang beton, dimana tegangan yang timbul dievaluasi untuk mengukur perilaku struktur. Pada tahap ini, yang diperhatikan adalah Pemendekan Elastis Beton (ES), Gesekan (FR), dan Pengangkuran (ANC).

3.8.1 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Angkur (*Anchorage Friction*)

Kehilangan tegangan akibat gesekan angkur terjadi ketika gaya prategang yang diterapkan pada tendon berkurang karena adanya gesekan antara tendon dan angkur. Penurunan gaya ini biasanya mencapai sekitar 3%, sehingga sekitar 97% dari gaya prategang tetap efektif setelah diterapkan pada struktur beton. Faktor-faktor yang mempengaruhi gesekan angkur termasuk kondisi permukaan angkur dan jenis pelapisan tendon.

Efek gesekan angkur perlu diperhitungkan dalam desain struktur, karena dapat memengaruhi distribusi tegangan dan kapasitas beban struktur secara keseluruhan Nawy (2001) Dengan rumus sebagai berikut:

$$P_o = 97\% \times P_j \quad (3.12)$$

Yang dimana P_j adalah gaya prategang yang diterapkan, dan P_o adalah gaya prategang setelah dikurangi akibat gesekan angkur.

3.8.2 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Cable (*Jack Friction*)

Kehilangan gaya akibat gesekan kabel terjadi ketika tendon ditarik melalui saluran pelindung, menyebabkan penurunan gaya prategang sepanjang tendon. Besar kehilangan gaya ini di pengaruhi oleh panjang tendon yang ditarik, koefisien gesekan, dan jenis pelindung yang digunakan.

Gesekan kabel dihitung dengan memperhitungkan koefisien gesekan dan panjang tendon yang ditarik, dimana kehilangan gaya lebih signifikan pada tahap awal penegangan Nawy (2001) Dengan rumus sebagai berikut:

$$P_x = P_o \times e^{-\mu x (\alpha + \beta \cdot Lx)} \quad (3.13)$$

Yang dimana P_o adalah gaya prategang setelah kehilangan akibat gesekan angkur, μ adalah koefisien gesekan antara tendon dan angkur, α adalah sudut lintasan tendon dari ujung ke tengah, β adalah koefisien tambahan yang berkaitan dengan faktor-faktor lainnya, dan Lx adalah panjang tendon dari ujung angkur ke titik tertentu.

3.8.3 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pemendekan Elastis (*Elastic Shortening*)

Pemendekan elastis terjadi ketika beton terkompresi akibat gaya prategang, yang menyebabkan penurunan tegangan pada tendon. Kehilangan tegangan ini mempengaruhi total kehilangan tegangan dalam struktur beton prategang, terutama pada balok dengan jumlah strand yang cukup banyak Nawy (2001) Kehilangan tegangan elastis dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\Delta P_e = \Delta \sigma_{pe} \times A_t \quad (3.14)$$

Dimana ΔP_e adalah kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis, $\Delta \sigma_{pe}$ adalah perubahan tegangan akibat pemendekan elastis, dan A_t adalah luas penampang tendon. Kehilangan tegangan ini harus diperhitungkan dalam analisis total kehilangan tegangan pada struktur beton prategang, karena dapat mempengaruhi kekuatan dan ketahanan struktur tersebut. Semakin besar panjang tendon dan gaya prategang yang diterapkan semakin besar pula kehilangan tegangan elastis yang terjadi.

3.8.4 Kehilangan Gaya Prategang Akibat Pengangkuran (*Anchoring*)

Kehilangan tegangan di area *anchoring* terutama disebabkan oleh gesekan antara tendon dan perangkat *anchoring*, yang mengakibatkan pengurangan tegangan secara lokal pada ujung tendon Nawy (2001). Hal ini terjadi karena gaya prategang yang diterapkan pada tendon mengalami penurunan di sepanjang tendon, terutama pada bagian *anchoring*, akibat gesekan yang terjadi di sana.

Perhitungan kehilangan gaya prategang akibat pengangkuran dapat dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$\Delta_p = L_{max} * \tan w \quad (3.15)$$

Dimana Δ_A adalah luas tampang tendon baja, L adalah panjang tarik masuk, dan $\tan w$ adalah kemiringan diagram gaya.

3.8.5 Kehilangan Gaya Prategang Akibat *Relaxation of Tendon*

Kehilangan tegangan akibat *relaxation of tendon* dapat disebabkan oleh dua faktor utama yaitu pengaruh susut dan pengaruh rayapan

1. Pengaruh Susut (*Shrinkage*)

Susut pada beton terjadi akibat penurunan volume beton seiring dengan proses pengeringan atau rekasi kimia dalam material beton, yang menyebabkan beton menyusut seiring waktu Nawy (2001) Meskipun gaya prategang tetap diterapkan pada tendon, susut beton ini akan menyebabkan penurunan tegangan pada tendon, karena beton yang menyusut akan menarik tendon yang tertanam di dalamnya. Akibatnya, gaya prategang dalam tendon berkurang, yang berkontribusi pada hilangnya tegangan secara keseluruhan.

Pengaruh susut dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\sigma_{sh} = \Delta \epsilon_{su} * E_s \quad (3.16)$$

yang dimana $\Delta \epsilon_{su}$ adalah presentase luas tulangan memanjang terhadap luas tampang balok, dan E_s adalah modulus elastis baja prategang.

2. Pengaruh Rayapan (*Creep*)

Rayapan tendon mengakibatkan pengurangan bertahap dari gaya prategang akibat deformasi material tendon yang bergantung pada waktu di bawah beban yang tetap. Pengaruh rayapan dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$\sigma_{cr} = \epsilon_{cr} * E_s \quad (3.17)$$

Dimana ϵ_{cr} adalah regangan akibat *creep* dan E_s adalah modulus elastis baja prategang (*strand*). Kehilangan tegangan akibat rayapan ini menjadi lebih signifikan seiring bertambahnya waktu. Semakin besar tingkat rayapan, semakin besar pulang tegangan yang terjadi dalam beton

BAB IV

METODELOGI PENELITIAN

4.1 Tinjauan Umum

Analisis struktur balok beton prategang diperlukan dalam perencanaan untuk menghasilkan desain yang aman, efisien, dan optimal. Untuk melakukan perencanaan yang tepat, dibutuhkan data yang mendukung proses analisis pengaruh jumlah *strand* terhadap total kehilangan gaya prategang pada balok beton tipe PCI Girder. Pada bab ini, penulis akan menjelaskan tahapan perencanaan untuk mengoptimalkan penggunaan beton prategang tipe PCI Girder dengan menganalisis pengaruh jumlah strand terhadap kehilangan tegangan.

4.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Jalan Tol Yogyakarta-Bawen, tepatnya pada Paket 1 Seksi 1 dengan trase STA 67+500 sampai STA 76+300. Lokasi penelitian difokuskan pada STA 76+300 Kec. Mlati, Kab. Sleman. Pemilihan lokasi ini didasarkan pada pengalaman peneliti yang sebelumnya melakukan kerja praktik di area tersebut. Peta lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut.



Gambar 4.1 Peta Lokasi Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1

4.3 Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, data struktur diperoleh dari PT. Eskapindo Matra KSO PT Mitrapacific sebagai konsultan pengawas Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi I. Data yang didapatkan adalah sebagai berikut.

Nama <i>Elevated</i>	: Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1
Lokasi <i>Elevated</i>	: Sleman-Banyurejo
Tahun Pembuatan	: 2024
Konstruksi Atas	: Beton <i>PCI Girder</i>
Konstruksi Bawah	: Beton Bertulang
Jenis Pondasi	: Fondasi Tiang Bor
Panjang Jembatan	: 40,8 m
Lebar Jembatan	: 40 – 50 m
Jumlah Lajur	: 2 lajur
Jumlah Bentang	: 1 bentang
Jumlah Abutmen	: 2 abutmen

4.4 Tahap Analisis

Analisis pada penelitian ini dilaksanakan berdasarkan data teknis lapangan. Perhitungan struktur jembatan akan dilakukan dengan *software Microsoft Excel* dengan meninjau dari beberapa standar atau peraturan yang dipakai antara lain SNI 1725:2016 dan referensi dari para ahli dalam bidang teknik beton prategang seperti Nawy (2001), Lin.Y.T & Burns (1988). Adapun tahapan-tahapan dari analisis yang dilakukan ini adalah:

1. Analisis penampang balok prategang

Pada tahap ini, dilakukan pemeriksaan terhadap penampang balok prategang untuk memastikan bahwa desain balok mampu menahan beban yang diberikan dan memenuhi persyaratan yang berlaku. Proses ini mencakup perhitungan dimensi dan kapasitas balok dalam menahan tegangan yang terjadi.

2. Pembebanan

Pembebanan dilakukan untuk mengetahui jenis dan ukuran beban yang akan diterima oleh struktur jembatan. Beban yang dihitung mencakup Berat sendiri (MS), Beban Mati Tambahan (MA), Beban Lajur "D" (TD), Gaya Rem (TB), Beban Angin (EW), dan Beban Gempa (EQ).

3. Analisis momen dan gaya geser

Dilakukan perhitungan terhadap momen lentur dan gaya geser yang bekerja pada balok. Analisis ini penting untuk mengetahui sejauh mana kekuatan yang diperlukan untuk mengatasi gaya-gaya yang mempengaruhi struktur.

4. Tegangan pada penampang balok

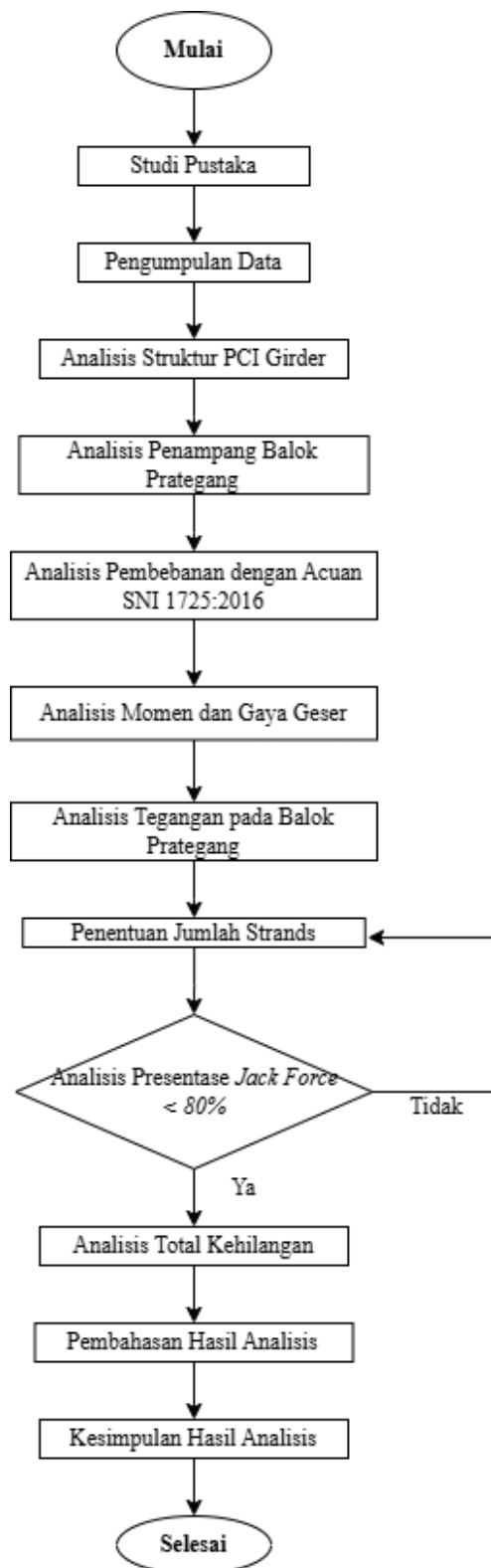
Analisis ini dilakukan untuk menghitung tegangan yang terjadi pada penampang balok akibat beban yang diterima. Diantaranya adalah yang pertama keadaan awal (saat *transfer*) dan kondisi akhir (saat *service*).

5. Analisis kehilangan prategang

Tahap ini berfokus pada perhitungan kehilangan prategang yang disebabkan oleh berbagai faktor seperti *anchorage friction*, *jack friction*, *elastic shortening*, *anchoring* dan *relaxation of tendon*.

4.5 Tahap Penelitian

Analisis dalam penelitian ini menggunakan jenis beton prategang tipe PCI Girder. Berikut tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini dapat dilihat pada *flowchart* sebagai berikut.



Gambar 4.2 *Flowchart* Penelitian

BAB V

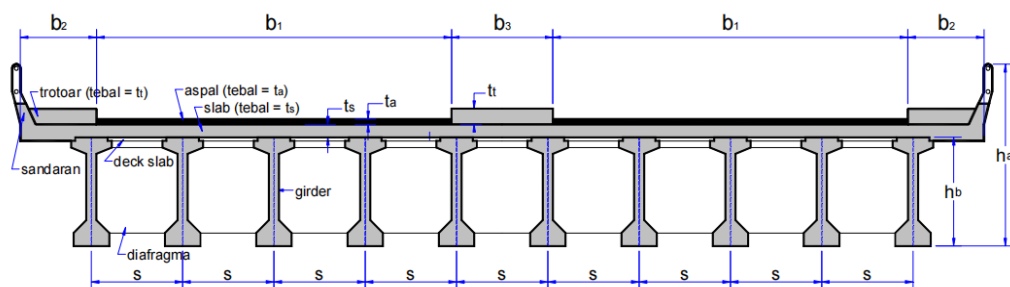
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Tinjauan Umum

Struktur *elevated* dalam penelitian ini adalah Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1 yang terletak di Sleman-Banyurejo, Jawa Tengah. Struktur utama ini menggunakan konstruksi beton prategang PCI *Girder*. Analisis struktur menggunakan program *Microsoft Excel*. Dalam analisis ini, pembebanan yang dilakukan mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan dan perhitungan struktur yang mengacu pada buku Nawy (2001) dan Lin.Y.T & Burns (1988).

5.2 Perhitungan Struktur PCI *Girder*

Perhitungan struktur PCI *Girder* dilakukan menggunakan program *Microfost Excel* berdasarkan data utama yang diperoleh dari lokasi proyek Jalan Tol Yogyakarta – Bawen Paket 1 Seksi 1. berikut data utama yang digunakan dalam perhitungan struktur PCI *Girder* dan dapat gambar potongan melintang jembatan dapat dilihat pada Gambar 5.1 berikut.



Gambar 5.1 Potongan Melintang *Elevated*

Panjang balok PCI <i>Girder</i>	L	$= 40,8 \text{ m}$
Jarak antar <i>girder</i>	s	$= 2,45 \text{ m}$
Tebal pelat lantai	$t_a = h_o$	$= 0,25 \text{ m}$

Tebal lapisan aspal+overlay	$t_b = h_a = 0,50 \text{ m}$
Tinggi genangan air hujan	$t_h = 0,05 \text{ m}$
Baja tulangan $D < 10 \text{ mm}$	$f_y = 400 \text{ MPa}$
Baja tulangan $D \leq 10 \text{ mm}$	$f_y = 240 \text{ MPa}$
Berat jenis beton	$W_c = 25,50 \text{ kN/m}$
Modulus elastis beton	$E_c = 35700 \text{ MPa}$
Modulus elastis baja	$E_s = 195000 \text{ MPa}$
Diameter <i>strand</i>	$D_{ps} = 15,2 \text{ mm}$
Luas penampang <i>strand</i>	$A_{st} = 140 \text{ mm}^2$

5.2.1 Perhitungan Struktur Utama

1. Data perencanaan

a. Gelagar beton

$$\begin{aligned}
 \text{Kuat tekan beton balok} \quad f_c' &= 58 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat tekan beton saat } \textit{stressing} \quad f_c'' &= 85\% \times f_c' \\
 &= 85\% \times 58 \\
 &= 49,3 \text{ Mpa} \\
 \text{Modulus elastisitas} \quad E_c &= 4700 \times \sqrt{f_c'} \\
 &= 4700 \times \sqrt{58} \\
 &= 35794,134 \text{ Mpa}
 \end{aligned}$$

b. Pelat beton

$$\begin{aligned}
 \text{Kuat tekan beton pelat} \quad f_c' &= 24,90 \text{ MPa} \\
 \text{Kuat tekan beton saat } \textit{stressing} \quad f_c'' &= 85\% \times f_c' \\
 &= 85\% \times 24,90 \\
 &= 21,16 \text{ MPa} \\
 \text{Modulus elastisitas} \quad E_{c_{plat}} &= 23452,95 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

c. Baja prategang

kabel baja prategang yang terdiri dari beberapa kawat baja untai "Strands cable" standar VSL dengan tipe *Uncoated 7 wire super strand* 15,2 m ASTM A-416 *grade* 270 yang dapat dilihat pada Tabel 5.1 sebagai berikut.

Tabel 5.1 Properties Strands I Girder

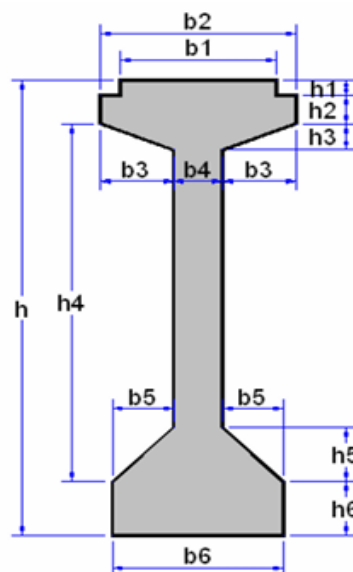
Jenis strands	Uncoated 7 wire super strand 15,2 m ASTM A-416 grade 270		
Kuat tarik <i>strands</i>	F_{pu}	1860	MPa
Tegangan leleh <i>strands</i>	F_{py}	1674	MPa
Diameter <i>strands</i>	D_{ps}	15,2	mm
Luas tampang nominal satu <i>strands</i>	A_{st}	140	mm ²
Beban putus satu <i>strands</i>	P_{bs}	260	kN
Jumlah kawat untaian dalam satu tendon	n_{st}	12	Untaian
Diameter selubung tendon		96	mm
Modulus elastis <i>strands</i>	E_s	195000	MPa

d. Baja tulangan

Baja tulangan $D > 12$ mm (U-40)Kuat leleh baja $f_y = 400$ MPaBaja tulangan $D \leq 12$ mm (U-24)Kuat leleh baja $f_y = 240$ MPa

2. Dimensi Balok PCI Girder

Detail dimensi beton PCI Girder dapat dilihat pada Gambar 5.2 berikut.

**Gambar 5.2 Detail Dimensi PCI Girder**

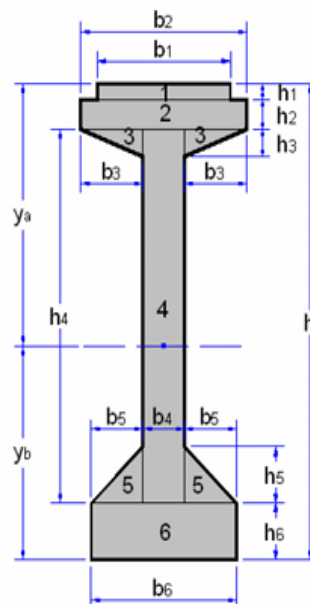
Dari gambar 5.2 di atas dapat dilihat mengenai detail pembagian dimensi PCI *Girder* sehingga akan mempermudah dalam proses perhitungan, maka dari itu perhitungan detail dimensi PCI *Girder* dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut.

Tabel 5.2 Dimensi PCI *Girder*

Kode	Lebar (m)	Kode	Tebal (m)
b1	0,64	h1	0,07
b2	0,80	h2	0,13
b3	0,30	h3	0,12
b4	0,20	h4	1,28
b5	0,25	h5	0,25
b6	0,70	h6	0,25
		htotal	2,10

3. Inersia Momen Balok Prategang PCI *Girder*

Inersia Momen Balok Prategang PCI *Girder* dapat dilihat pada Gambar 5.3 berikut.



Gambar 5.3 Inersia Momen Balok Prategang

Dari gambar 5.3 di atas di dapatkan hasil perhitungan Inersia Momen Balok Prategang yang dapat dilihat pada tabel 5.3 berikut.

Tabel 5.3 Inersia Momen Balok Prategang

No	Dimensi		Luas Tampang	Jarak thd alas	Statis Momen	Inersia Momen (I)	Inersia Momen (II)
	Lebar	Tinggi					
	b	h					
	(m)	(m)					
1	0,64	0,07	0,045	2,070	0,093	0,192	0,00002
2	0,8	0,13	0,104	1,970	0,205	0,404	0,00015
3	0,3	0,12	0,036	1,860	0,067	0,125	0,00003
4	0,2	1,28	0,256	1,080	0,276	0,299	0,07487
5	0,25	0,25	0,063	0,330	0,021	0,007	0,00022
6	0,7	0,25	0,175	0,130	0,023	0,003	0,00091
Jumlah			0,678		0,684	1,028	0,076

Tinggi penampang balok

$$H = 2,10 \text{ m}$$

Luas penampang balok

$$A = 0,678 \text{ m}^2$$

Letak titik berat (C_g) :

Titik berat dari bawah

$$\begin{aligned}
 y_b &= \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} \\
 &= \frac{0,684}{0,678} \\
 &= 1,009 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Titik berat dari atas

$$\begin{aligned}
 y_a &= H - Y_b \\
 &= 2,10 - 1,009 \\
 &= 1,091 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Momen inersia Total :

Inersia Momen (I) + Inersia Momen (II)

Terhadap alas balok

$$\begin{aligned}
 I_b &= \sum A \cdot y^2 + \sum I_o \\
 &= 1,028 + 0,076 \\
 &= 1,1045 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Terhadap titik berat balok

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

$$= 1,1045 - (0,678 \cdot 1,009^2)$$

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

Tahanan momen sisi atas

$$W_a = \frac{I_x}{y_a}$$

$$= \frac{0,414}{1,091}$$

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

Tahanan momen sisi bawah

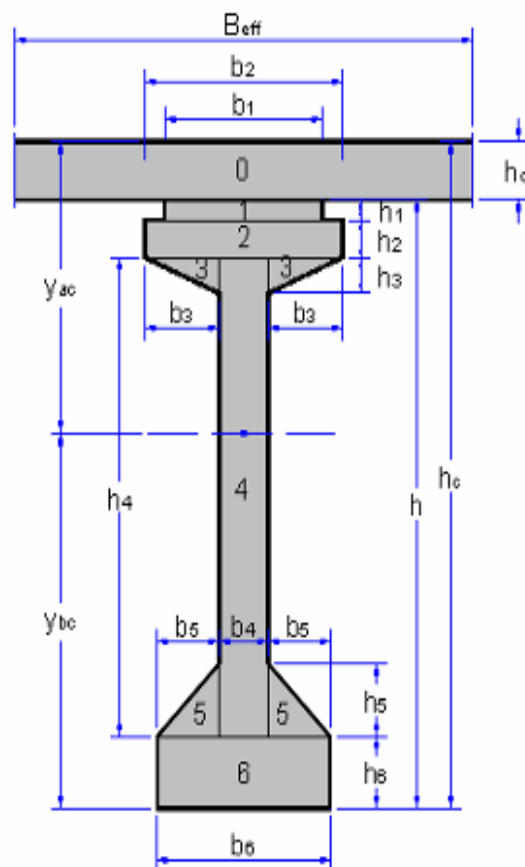
$$W_b = \frac{I_x}{y_b}$$

$$= \frac{0,414}{1,009}$$

$$= 0,410 \text{ m}^2$$

4. Inersia Momen Balok Komposit (Balok Prategang + Plat)

Inersia Momen Balok Komposit (Balok Prategang + Plat) dapat dilihat pada Gambar 5.4 berikut.



Gambar 5.4 Inersia Momen Balok Komposit

Dari gambar 5.4 di atas di dapatkan hasil perhitungan Inersia Momen Balok Prategang yang dapat dilihat pada tabel 5.4 berikut.

Tabel 5.4 Inersia Momen Balok Composit

No	Dimensi		Luas Tampang	Jarak thd alas	Statis Momen	Inersia Momen (I)	Inersia Momen (II)
	Lebar	Tinggi					
	b	h					
	(m)	(m)					
0	1,18	0,25	0,295	2,220	0,649	1,142	0,00154
1	0,64	0,07	0,045	2,070	0,093	0,192	0,00002
2	0,8	0,13	0,104	1,970	0,205	0,404	0,00015
3	0,3	0,12	0,036	1,860	0,067	0,125	0,00003
4	0,2	1,28	0,256	1,080	0,276	0,299	0,07487
5	0,25	0,25	0,063	0,330	0,021	0,007	0,00022
6	0,7	0,25	0,175	0,130	0,023	0,003	0,00091
Jumlah			0,973		1,333	2,456	0,078

Tinggi total balok composit $H_c = 2,35 \text{ m}$

Luas penampang balok composit $A_c = 0,973 \text{ m}^2$

Letak titik berat (C_{gc}) :

$$\begin{aligned}
 \text{Titik berat dari bawah} \quad y_{bc} &= \frac{\sum A \cdot y}{\sum A} \\
 &= \frac{1,333}{0,9733} \\
 &= 1,370 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Titik berat dari atas} \quad y_{ac} &= H_c - y_{bc} \\
 &= 2,35 - 1,370 \\
 &= 0,98 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Momen inersia Total : Inersia Momen (I) + Inersia Momen (II)

$$\begin{aligned}
 \text{Terhadap alas balok} \quad I_{bc} &= \sum A \cdot y^2 + \sum I_o \\
 &= 2,456 + 0,078 \\
 &= 2,534 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

$$\text{Terhadap titik berat balok} \quad I_{xc} = I_{bc} - \sum A \cdot y_{bc}^2$$

$$= 2,534 - (0,973 \cdot 1,3700^2)$$

$$= 0,707 \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} \text{Tahanan momen sisi atas plat} \quad W_{ac} &= \frac{I_{xc}}{Y_{ac}} \\ &= \frac{0,707}{0,98} \end{aligned}$$

$$= 0,721 \text{ m}^4$$

$$\begin{aligned} \text{Tahanan momen sisi atas balok} \quad W'_{ac} &= \frac{I_{xc}}{(Y_{ac} - H_o)} \\ &= \frac{0,707}{(0,98 - 0,20)} \end{aligned}$$

$$= 0,968 \text{ m}^3$$

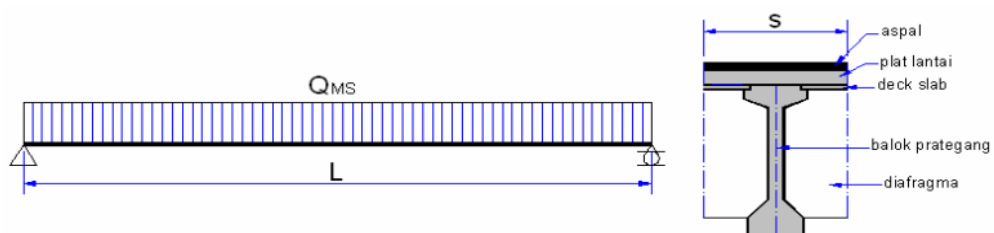
$$\begin{aligned} \text{Tahanan momen sisi bawah balok} \quad W_{bc} &= \frac{I_{xc}}{Y_{bc}} \\ &= \frac{0,707}{1,3700} \end{aligned}$$

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

5.3 Pembebanan

Pembebanan pada penelitian ini mengacu pada SNI 1725-2016 tentang Pembebanan Untuk Jembatan. Berikut uraian pembebanan yang dilakukan dalam perencanaan PCI *Girder* dalam penelitian ini.

5.3.1 Beban Sendiri (MS)



Gambar 5.5 Beban Sendiri Balok Prategang

1. Berat Balok

$$\text{Luas Penampang} \quad A = 0,678 \text{ m}^2$$

$$\text{Berat jenis beton prategang} \quad w_c = 25,50 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Panjang bentang} \quad L = 40,8 \text{ m}$$

Berat sendiri balok	$Q_{MS} = A \times W_c$ $= 0,678 \times 25,50$ $= 17,297 \text{ kN/m}$
Gaya geser balok	$V_{MS} = \frac{1}{2} \times Q_{MS} \times L$ $= \frac{1}{2} \times 17,297 \times 40,8$ $= 352,85 \text{ kN}$
Momen balok	$M = \frac{1}{8} \times Q_{MS} \times L^2$ $= \frac{1}{8} \times 17,297 \times 40,8^2$ $= 3599,08 \text{ kNm}$

2. Berat Pelat

Lebar pelat	$b = 1,8 \text{ m (Gambar 5.5)}$
Tebal Pelat	$h = 0,25 \text{ m (Lampiran 1)}$
Luas pelat	$A = b \times h$ $= 1,8 \times 0,25$ $= 0,45 \text{ m}^2$
Berat sendiri pelat	$Q_{MS} = A \times W_c$ $= 0,45 \times 25,5$ $= 11,25 \text{ kN/m}$
Gaya geser pelat	$V_{MS} = \frac{1}{2} \times Q_{MS} \times L$ $= \frac{1}{2} \times 11,25 \times 40,8$ $= 229,50 \text{ kN}$
Momen pelat	$M = \frac{1}{8} \times Q_{MS} \times L^2$ $= \frac{1}{8} \times 11,25 \times 40,8^2$ $= 2340,9 \text{ kNm}$

3. Berat Deck Slab

Lebar pelat	$b = 1,16 \text{ m (Gambar 5.5)}$
Tebal pelat	$h = 0,07 \text{ m (Gambar 5.5)}$

Luas	$A = b \times h$ $= 1,16 \times 0,07$ $= 0,081 \text{ m}^2$
Berat sendiri pelat deck	$Q_{MS} = A \times W_c$ $= 0,081 \times 25,50$ $= 2,030 \text{ kN/m}$
Gaya geser pelat deck	$V_{MS} = \frac{1}{2} \times Q_{MS} \times L$ $= \frac{1}{2} \times 2,030 \times 40,8$ $= 41,412 \text{ kN}$
Momen pelat deck	$M = \frac{1}{8} \times Q_{MS} \times L^2$ $= \frac{1}{8} \times 2,030 \times 40,8^2$ $= 422,402 \text{ kNm}$

4. Berat Diafragma



Gambar 5.6 Diafragma antar Girder

Jumlah diafragma antar girder	$n = 9$
Panjang diafragma	$L = 16,5 \text{ m}$
Berat diafragma ekivalen	$Q_{MS} = 3,728 \text{ kN/m}$
Gaya geser diafragma	$V_{MS} = \frac{1}{2} \times Q_{MS} \times L$ $= \frac{1}{2} \times 3,728 \times 16,5$ $= 30,756 \text{ kN}$
Momen diafragma	$M = \frac{1}{8} \times Q_{MS} \times L^2 \times n$ $= \frac{1}{8} \times 3,728 \times 16,5^2$ $= 126,86 \text{ kNm}$

5.3.2 Beban Mati Tambahan (MA)

1. Aspal

Berat jenis aspal	$W_{\text{aspal}} = 22 \text{ kN/m}^3$
Tebal lapisan aspal	$h_a = 0,05 \text{ m}$ (Lampiran 1)
Lebar aspal	$b = 1,80 \text{ m}$ (Gambar 5.5)
Luas	$A = b \times h$ $= 1,80 \times 0,05$ $= 0,09 \text{ m}^2$
Panjang bentang	$L = 40,8 \text{ m}$
Berat tambahan	$Q_{\text{MA}} = A \times W_{\text{aspal}}$ $= 0,09 \times 22$ $= 1,980 \text{ kN/m}$
Gaya geser	$V_{\text{MA}} = \frac{1}{2} \times Q_{\text{MA}} \times L$ $= \frac{1}{2} \times 1,980 \times 40,8$ $= 40,392 \text{ kN}$
Momen tambahan	$M_{\text{MA}} = \frac{1}{8} \times Q_{\text{MA}} \times L^2$ $= \frac{1}{8} \times 1,980 \times 40,8^2$ $= 411,9 \text{ kNm}$

2. Air hujan

Berat jenis air hujan	$W_{\text{air}} = 9,8 \text{ kN/m}^3$
Tinggi genangan air hujan	$t_{\text{hujan}} = 0,05 \text{ m}$
Lebar	$b = 1,80 \text{ m}$
Luas	$A = b \times h$ $= 1,80 \times 0,05$ $= 0,090 \text{ m}^2$
Berat tambahan	$Q_{\text{MA}} = A \times W_{\text{air}}$ $= 0,090 \times 9,8$ $= 0,882 \text{ kN/m}$
Gaya geser	$V_{\text{MA}} = \frac{1}{2} \times Q_{\text{MA}} \times L$

$$= \frac{1}{2} \times 0,882 \times 40,8$$

$$= 17,993 \text{ kN}$$

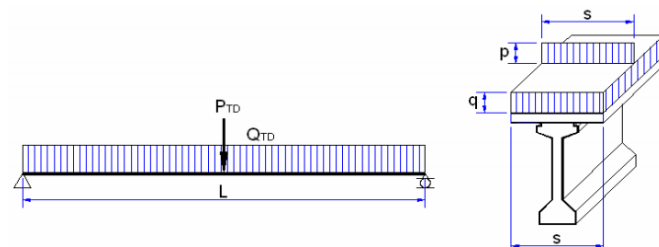
Momen tambahan

$$M_{MA} = \frac{1}{8} \times Q_{MA} \times L^2$$

$$= \frac{1}{8} \times 0,882 \times 40,8^2$$

$$= 183,527 \text{ kNm}$$

5.3.3 Beban Lajur D



Gambar 5.7 Beban Lajur D

Panjang jembatan $L = 40,8 \text{ m}$

Karena panjang bentang $L > 30 \text{ m}$ maka intensitas beban dihitung dengan persamaan 3.10 berikut.

Beban merata

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

$$= 9 \times \left(0,5 + \frac{15}{40,8}\right)$$

$$= 7,809 \text{ kPa}$$

Jarak antara balok prategang $s = 2,450 \text{ m}$

Beban terbagi merata

$$Q_{TD} = q \times s$$

$$= 7,809 \times 2,450$$

$$= 19,132 \text{ kN/m}$$

Beban garis terpusat atau p ditetapkan sebesar 49 kN/m sesuai dengan ketentuan SNI 1725:2016 yang diletakkan pada tengah bentang agar mendapatkan momen terbesar, dan Faktor beban dinamis (FBD) untuk $L \leq 50 \text{ m}$ yaitu 40%.

Beban terpusat pada balok

$$P_{TD} = (1 + FBD) \times p \times s$$

$$= (1 + 40\%) \times 49 \times 2,450$$

$$= 168,070 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya geser balok akibat beban lajur } V_{TD} = \frac{1}{2} \times (Q_{TD} \times L + P_{TD})$$

$$= \frac{1}{2} \times (19,132 \times 40,8 + 168,070)$$

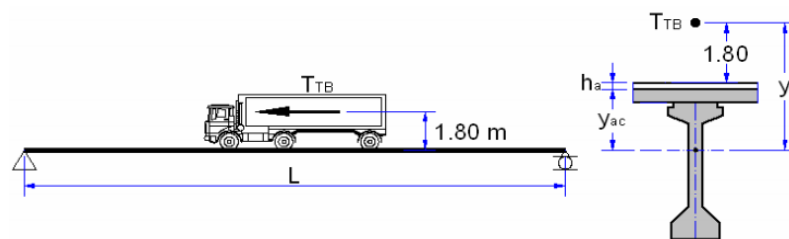
$$= 474,320 \text{ kN}$$

$$\text{Momen balok akibat beban lajur } M_{TD} = \frac{1}{8} \times Q_{TD} \times L^2 + P_{TD} \times L$$

$$= \frac{1}{8} \times 19,132 \times 40,8^2 + 168,07 \times 40,8$$

$$= 5695,221 \text{ kNm}$$

5.3.4 Gaya Rem (TB)



Gambar 5.8 Gaya Rem

$$\text{Panjang jembatan } L = 40,8 \text{ m}$$

$$\text{Berat gandar truk desain} = 500 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{a. } 5\% \text{ berat gandar truk} + \text{BTR} &= 5\% \times (BTR + Q_{td} \times L) \\ &= 5\% \times (500 + 19,132 \times 40,8) \end{aligned}$$

$$= 64,029 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{b. } 25\% \text{ berat gandar truk desain} &= 25\% \times 500 \\ &= 125 \text{ kN} \end{aligned}$$

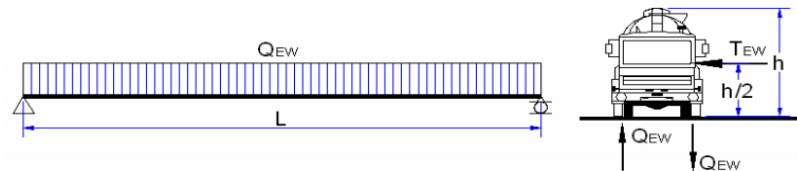
$$\text{Beban rem } P_{TB} = 125 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Gaya geser } V_{TB} &= \frac{1}{2} \times P_{TB} \\ &= \frac{1}{2} \times 125 \\ &= 62,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\text{Momen } M_{TB} = \frac{1}{4} \times P_{TB} \times L$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{4} \times 125 \times 40,8 \\
 &= 1275 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

5.3.5 Beban Angin (EW)

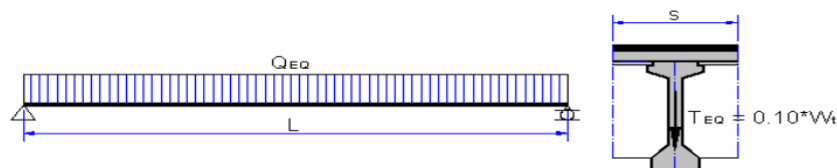


Gambar 5.9 Beban Angin

Berdasarkan ketentuan dalam SNI 1725:2016, beban angin dinyatakan sebagai tekanan merata (TEW) sebesar 1,46 kN/m. Bidang vertikal yang menerima hembusan angin diasumsukan sebagai sisi samping kendaraan dengan tinggi $h = 1,8$ m dari permukaan lantai jembatan, sementara jarak antara roda kendaraan diambil sebesar $x = 1,75$ m.

Transfer beban angin	$Q_{EW} = 2 \times \frac{h}{x} \times T_{EW}$ $= 2 \times \frac{1,8}{1,75} \times 1,46$ $= 3,337 \text{ kN/m}$
Gaya geser	$V_{EW} = \frac{1}{2} \times Q_{EW} \times L$ $= \frac{1}{2} \times 3,337 \times 40,8$ $= 68,078 \text{ kN}$
Momen	$M_{EW} = \frac{1}{8} \times Q_{EW} \times L^2$ $= \frac{1}{8} \times 3,337 \times 40,8^2$ $= 694,393 \text{ kNm}$

5.3.6 Beban Gempa (EQ)



Gambar 5.10 Beban Gempa

Beban Sendiri	$Q_{MS} = MS_1 + MS_2 + MS_3 + MS_4$ $= 34,304 \text{ kN/m}$
Beban mati tambahan	$Q_{MA} = MA_1 + MA_2$ $= 2,682 \text{ kN/m}$
Panjang bentang balok	$L = 40,8 \text{ m}$
Kuat tekan beton	$F_c' = 41,50 \text{ MPa}$
Berat total jembatan	$W_t = (Q_{MS} + Q_{MA}) \times L$ $= (34,304 + 2,682) \times 40,8$ $= 1516,39 \text{ Kn}$
Momen inersia balok	$I_x = 0,707 \text{ m}^4$
Modulus elastik beton	$E_c = 35794 \text{ MPa}$
Kekakuan balok	$K = \frac{48 \times E_c \times I_x}{L^3}$ $= \frac{48 \times 35794 \times 0,707}{40,8^3}$ $= 17890 \text{ kN/m}$
Waktu getar	$T = 2\pi \sqrt{\frac{W_t}{g \times K}}$ $= 2\pi \sqrt{\frac{1516,39}{9,81 \times 17890}}$ $= 0,584 \text{ detik}$
Koefisien geser dasar	$C = 0,125$
Faktor perangkaan	$F = 1,225$
Faktor tipe struktur	$S = 1,3 \times F$ $= 1,3 \times 1,225$ $= 1,593$
Koefisien beban gempa horizontal	$K_h = 0,1991$
Koefisien beban gempa vertikal	$K_v = 50\% \times K_h$ $= 50\% \times 0,1991$ $= 0,10$
Gaya gempa vertikal	$T_{EQ} = K_v \times W_t$ $= 0,10 \times 1516,39$ $= 151,639 \text{ kN}$

Beban gempa vertikal $Q_{EQ} = \frac{T_{EQ}}{L}$

$$= \frac{151,639}{40,8}$$

$$= 3,716 \text{ kN/m}$$

Gaya geser $V_{EQ} = \frac{1}{2} \times Q_{EQ} \times L$

$$= \frac{1}{2} \times 3,716 \times 40,8$$

$$= 75,806 \text{ kN}$$

Momen $M_{EQ} = \frac{1}{8} \times Q_{EQ} \times L^2$

$$= \frac{1}{8} \times 3,716 \times 40,8^2$$

$$= 773,225 \text{ kN/m}$$

5.3.7 Rekapitulasi Pembebanan

Berikut tabel rekapitulasi hasil pembebanan dapat dilihat pada Tabel 5.5 berikut.

Tabel 5.5 Rekapitulasi Pembebanan

Rekapitulasi Pembebanan	Kode	Q (kN/m)	P (kN)	V (kN)	M (kNm)
Berat mati sendiri (gelagar)	MS	17,297	-	352,850	3599,080
Berat mati sendiri (pelat)	MS	11,250	-	229,50	2340,9
Berat mati sendiri (pelat <i>deck</i>)	MS	2,030	-	41,412	422,402
Berat diafragma	MS	3,728	-	30,756	126,86
Berat mati tambahan (aspal)	MA	1,980	-	40,392	411,9
Berat mati tambahan (hujan)	MA	0,882	-	17,993	183,527
Beban lajur "D"	TD	19,132	168,070	474,320	5695,221
Beban rem	TB	125	-	62,500	1275
Beban angin	EW	3,337	-	68,078	694,393
Beban gempa	EQ	3,716	-	75,806	773,225
Jumlah		188,352	168,070	1393,607	15522,508

5.3.8 Kombinasi Beban

Setiap beban yang bekerja selanjutnya dikombinasikan mengacu pada standar pembebanan SNI 1725-2016. Hasil penyusunan kombinasi beban berikut nilai faktor ultimitnya dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut.

Tabel 5.6 Faktor Ultimit Kombinasi Pembebanan yang digunakan

No	Jenis Beban	Faktor Beban	Kombinasi		
			1	2	3
1	Berat Sendiri (MS)	1,2	√	√	√
2	Beban Mati Tambahan (MA)	2,0	√	√	√
3	Beban Lajur (TD)	1,8	√	√	√
4	Gaya Rem (TB)	1,8	√	√	
5	Beban Angin (EW)	1,2	√		
6	Beban Gempa (EQ)	1,0			√

Perhitungan momen rencana dilakukan dengan mengalikan momen yang bekerja terhadap faktor beban ultimit, kemudian dikombinasikan berdasarkan acuan pada Tabel 5.6 di atas. Hasil akhir kombinasi momen ultimit dan gaya geser disajikan pada Tabel 5.7 dan Tabel 5.8 berikut.

Tabel 5.7 Rekapitulasi Kombinasi Momen Ultimit

No	Jenis Beban	Faktor Beban	Momen (kNm)	Kombinasi		
				1	2	3
1	Berat Sendiri (MS)	1,2	6489,242	7787,09	7787,09	7787,09
2	Beban Mati Tambahan (MA)	2,0	595,427	1190,85	1190,85	1190,85
3	Beban Lajur (TD)	1,8	5695,221	10251,4	10251,4	10251,4
4	Gaya Rem (TB)	1,8	1275	2295	2295	-
5	Beban Angin (EW)	1,2	694,393	833,272	-	-
6	Beban Gempa (EQ)	1,0	773,225	773,225	-	773,225
Jumlah				23130,8	21521,3	20002,6

Tabel 5.8 Rekapitulasi Kombinasi Beban Gaya Geser

No	Jenis Beban	Faktor Beban	Gaya geser (kN)	Kombinasi		
				1	2	3
1	Berat Sendiri (MS)	1,2	654,518	785,422	785,422	785,422
2	Beban Mati Tambahan (MA)	2,0	58,385	116,77	116,77	116,77
3	Beban Lajur (TD)	1,8	474,320	853,776	853,776	853,776
4	Gaya Rem (TB)	1,8	62,500	112,500	112,500	-
5	Beban Angin (EW)	1,2	68,078	81,694	-	-
6	Beban Gempa (EQ)	1,0	75,806	75,806	-	75,806
Jumlah				2025,87	1868,47	1831,77

5.4 Perhitungan Gaya Prategang , Tendon dan Eksentrisitas

PCI Girder pada penelitian ini dirancang dengan sistem pascatarik (*post-tension*), sehingga penentuan gaya prategang, eksentrisitas, dan kebutuhan jumlah tendon dihitung melalui tahapan perhitungan sebagai berikut.

5.4.1 Gaya Prategang

Batas tegangan yang diizinkan pada beton prategang ditinjau dalam dua kondisi yang berbeda, yaitu:

- Kondisi awal (saat *transfer*)
- Kondisi beban layan (*service*)

Batas tegangan yang diizinkan pada beton prategang pada kedua kondisi tersebut kemudian diuraikan sebagai berikut.

Digunakan mutu beton prategang $f_c' = 58 \text{ MPa}$

Transfer gaya prategang dianggap telah mencapai sekitar 85% dari kuat tekan rencana, maka:

$$\begin{aligned}
 \text{Kuat tekan beton pada kondisi awal} \quad f_{ci}' &= 0,85 \times f_c' \\
 &= 0,85 \times 58 \\
 &= 49,3 \text{ MPa} \\
 &= 49300 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Tegangan ijin beton saat *transfers*:

- a. Tegangan ijin tekan

$$\begin{aligned}
 &= 0,60 \times f_{ci}' \\
 &= 0,60 \times 49,3 \\
 &= 29,58 \text{ MPa} \\
 &= 29580 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$
- b. Tegangan ijin tarik

$$\begin{aligned}
 &= 0,50 \times \sqrt{f_{ci}'} \\
 &= 0,50 \times \sqrt{49,3} \\
 &= 3,51 \text{ MPa} \\
 &= 3510 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Tegangan ijin beton *service*:

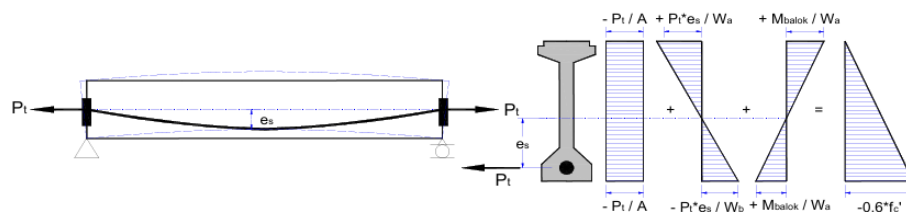
- a. Tegangan ijin tekan

$$\begin{aligned}
 &= 0,45 \times f_c' \\
 &= 0,45 \times 58 \\
 &= 26,1 \text{ MPa} \\
 &= 26100 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$
- b. Tegangan ijin tarik

$$\begin{aligned}
 &= 0,50 \times \sqrt{f_c'} \\
 &= 0,50 \times \sqrt{58} \\
 &= 3,81 \text{ MPa} \\
 &= 3810 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

1. Gaya prategang kondisi awal (saat *transfer*)

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya, nilai gaya prategang awal saat penyaluran PCI *Girder* harus dibatasi ($0,60 f_{ci}'$) seperti yang terlihat pada Gambar 5.5 di bawah ini.



Gambar 5.11 Diagram Tegangan Kondisi Awal (*Transfer*)

Tegangan ijin saat *transfer* ($0,60 f_{ci}'$) = 29580 kPa

Momen berat sendiri <i>Girder</i>	M_b	$= 3599,09 \text{ kNm}$
Luas penampang	A	$= 0,678 \text{ m}^2$
Tahanan momen sisi atas	W_a	$= 0,379 \text{ m}^3$
Tahanan momen sisi bawah	W_b	$= 0,410 \text{ m}^3$
Letak titik berat	y_b	$= 1,009 \text{ m}$
Jarak titik berat	Z_o	$= 0,1550 \text{ m}$
Eksentrisitas tendon	e_s	$= y_b - Z_o$ $= 1,009 - 0,1550$ $= 0,8540 \text{ m}$
Tegangan di serat atas	P_{t1}	$= \frac{M_b}{(e_s - (\frac{W_a}{A}))}$ $= \frac{3599,09}{(0,854 - (\frac{0,379}{0,678}))}$ $= 12221,53 \text{ kN}$
Tegangan di serat bawah	P_{t2}	$= \frac{(0,60 \cdot f_{ci}' \cdot W_b) + M_b}{((\frac{W_b}{A}) + e_s)}$ $= \frac{(29580 \cdot 0,4104) + 3599,09}{((\frac{0,4140}{0,6783}) + 0,8540)}$ $= 8069,41 \text{ kN}$

Gaya prategang awal terpakai dapat diambil nilai yang terkecil.

Gaya prategang awal	P_t	$= 8069,41 \text{ kN}$
---------------------	-------	------------------------

5.4.2 Jumlah Tendon

Dalam perencanaan ini digunakan kabel baja prategang yang tersusun dari beberapa kawat baja berbentuk untai (*strands*). Jenis dan spesifikasi *strands* yang dipakai mengikuti standar VSL, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.1 di atas.

2. Kondisi Akhir

Gaya prategang awal	P_t	$= 8069,41 \text{ kN}$
Beban putus satu <i>strand</i>	P_{bs}	$= 260 \text{ kN}$
Beban putus satu tendon	P_{b1}	$= P_{bs} \times n$ $= 260 \times 12$ $= 3120 \text{ kN}$
Reduksi putus satu <i>strand</i>	ϕ	$= 0,8$

$$\begin{aligned}
 \text{Tendon yang dibutuhkan } n_t &= \frac{p_t}{\phi \times 0,85 \times p_{b1}} \\
 &= \frac{8069,41}{0,8 \times 0,85 \times 3120} \\
 &= 3,803 \text{ tendon}
 \end{aligned}$$

$$\text{Diambil jumlah tendon } n_t = 4 \text{ tendon}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Strands minimal } n_{s \text{ min}} &= \frac{p_t}{\phi \times 0,85 \times p_{bs1}} \\
 &= \frac{8069,41}{0,8 \times 0,85 \times 260} \\
 &= 45,641 \text{ strands}
 \end{aligned}$$

$$\text{Strands pakai } n_s \text{ pakai} = 62 \text{ strands (kondisi eksisting)}$$

Pada penelitian ini akan coba divariasikan jumlah strand yang dipakai dalam rentang strand minimal dan strand eksisting, sehingga variasi jumlah strand yaitu 46 sampai dengan 62. Sebagai contoh perhitungan, digunakan jumlah strand eksisting yaitu 62.

Berdasarkan perhitungan di atas, digunakan 4 buah tendon yang disusun dalam 2 baris, dengan baris pertama berjumlah 3 tendon dan baris kedua 1 buah tendon, seperti yang terlihat pada Tabel 5.9 di bawah ini.

Tabel 5.9 Posisi Penyebaran Tendon

Kode	Tendon	Keterangan	ns	Keterangan	Jumlah strands tiap baris (Nst)	Keterangan
Tendon baris 1 (n_{t1})	2	Tendon	19	<i>Strands per tendon</i>	38	<i>Strands</i>
	1	Tendon	12	<i>Strands per tendon</i>	12	<i>Strands</i>
Tendon baris 2 (n_{t2})	1	Tendon	12	<i>Strands per tendon</i>	12	<i>Strands</i>
Total (n_t)	4	Tendon		Total (ns)	62	<i>Strands</i>

$$\begin{aligned}
 \text{Persentase tegangan leleh } P_o &= \frac{p_t}{0,85 \times n_s \times P_{bs}} \\
 &= \frac{8069,41}{0,85 \times 62 \times 260} \\
 &= 58,89 \% < 80\% \text{ (aman)}
 \end{aligned}$$

$$\text{Gaya prategag akibat jacking } P_j = P_o \times n_s \times P_{bs}$$

$$= 58,89\% \times 62 \times 260$$

$$= 9493,423 \text{ kN}$$

Diperkirakan kehilangan tegangan (*loss of prestress*) 30%

$$\text{Gaya prategang akhir} \quad P_{eff} = 70\% \times P_j$$

$$= 6645,40 \text{ kN}$$

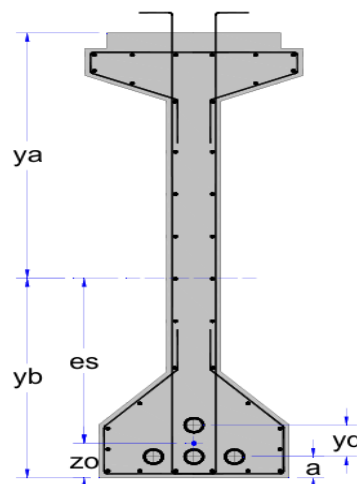
Sesuai dengan penelitian yang pernah dilakukan oleh Aulia & Hardawati (2026) yang menunjukkan bahwa penambahan jumlah *strands* berpengaruh terhadap persentase *jacking force* dengan pola berbanding terbalik. Ketika jumlah *strands* meningkat dari 46 menjadi 62, persentase *jacking force* turun dari 79,38% menjadi 58,89% dan seluruh nilainya masih memenuhi batas yang dipersyaratkan, yaitu di bawah 80%. Berikut rekapitulasi hasil perhitungan variasi jumlah *strands* dan persentase *jacking force* dapat dilihat pada Tabel 5.10 berikut.

Tabel 5.10 Hasil Perhitungan Variasi Jumlah Strands dan Persentase Jacking Force

No	Jumlah <i>Strands</i> (ns)	Persentase <i>Jacking Force</i> (P _o)
1	46	79,38%
2	47	77,69%
3	48	76,07%
4	49	74,52%
5	50	73,03%
6	51	71,59%
7	52	70,22%
8	53	68,89%
9	54	67,62%
10	55	66,39%
11	56	65,20%
12	57	64,06%
13	58	62,95%
14	59	61,89%
15	60	60,86%
16	61	59,86%
17	62	58,89%

5.4.3 Posisi Tendon di Tengah Bentang

Dari hasil analisis yang telah dilakukan, digunakan 4 tendon dengan sistem prategang *post-tensioning*. Tendon tersebut disusun dalam dua baris, dengan 3 tendon pada baris pertama dan 1 tendon pada baris kedua. Posisi tendon di tengah bentang dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut.



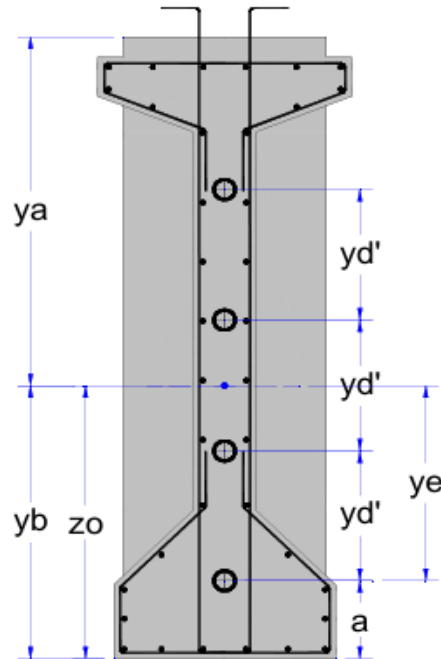
Gambar 5.12 Posisi Tendon di Tengah Bentang

Jarak alas ke titik berat tendon baris ke-1	$a = 0,120 \text{ m}$
Jumlah <i>strands</i> pakai	$n_s = 62 \text{ strands}$
Jumlah <i>strands</i> minimum 1 tendon	$n_{t2} = 12 \text{ strands}$
Jarak titik berat tendon terhadap alas	$Z_o = 0,155 \text{ m}$
Jarak vertikal antar tendon	$y_d = \frac{n_s \min x 0,85 x (z_o - a)}{n_2 x 0,85}$ $= \frac{45,64 x 0,85 x (0,155 - 0,12)}{12 x 0,85}$ $= 0,133 \text{ m}$ $= 0,140 \text{ m (dipakai)}$
Jarak baris tendon ke-2 terhadap alas	$Z_2 = a + y_d$ $= 0,12 + 0,140$ $= 0,260 \text{ m}$

Jadi dapat diketahui jarak tendon baris ke-1 dan ke-2 dari alas penampang ke titik berat tendon berturut-turut sebesar 0,120 m dan 0,260 m.

5.4.4 Posisi Tendon di Tumpuan

Posisi tendon di tumpuan dapat dilihat pada Gambar 5.7 di bawah ini.



Gambar 5.13 Posisi Tendon di Tumpuan

Berikut jumlah tendon masing-masing baris dapat dilihat pada Tabel 5.11 berikut.

Tabel 5.11 Jumlah Tendon Masing-Masing Baris

Jumlah tendon baris ke-1	n_1	1	Tendon	12	<i>Strands</i>
Jumlah tendon baris ke-2	n_2	1	Tendon	12	<i>Strands</i>
Jumlah tendon baris ke-3	n_3	1	Tendon	19	<i>Strands</i>
Jumlah tendon baris ke-4	n_4	1	Tendon	19	<i>Strands</i>
Jumlah		4	Tendon	62	<i>Strands</i>

Jarak tendon bawah terhadap alas $a' = 0,350 \text{ m}$

Letak titik berat tendon terhadap alas $y_b = 1,009 \text{ m}$

Letak titik berat tendon tendon terbawah $y_e = y_b - a'$
 $= 1,009 - 0,350$

$$= 0,659 \text{ m}$$

Jumlah *strands* pakai $ns = 62 \text{ strands}$

Momen statis tendon terhadap pusat tendon terbawah dapat dilihat pada Tabel 5.12 di bawah ini.

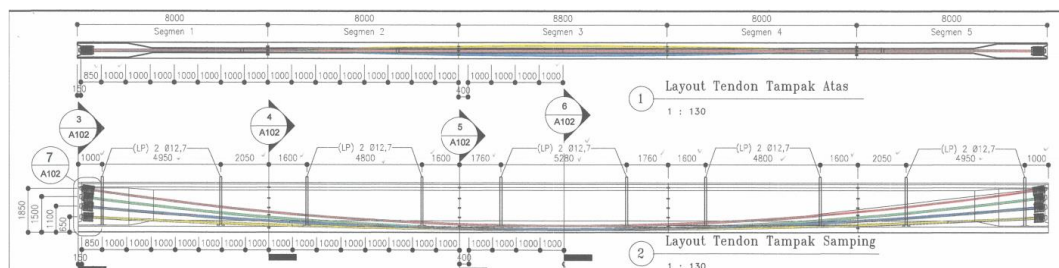
Tabel 5.12 Momen Statis

Baris tendon (ni)	Jumlah <i>strands</i> (nsi)	Jarak As tendon dengan As Tendon Terbawah (y_d')	Status Momen ($ni \times y_d'$)
n ₁	12	0 y_d'	0 y_d'
n ₂	12	1 y_d'	12 y_d'
n ₃	19	2 y_d'	38 y_d'
n ₄	19	3 y_d'	57 y_d'
Jumlah Σni			107 y_d'

$$\begin{aligned}
 \text{Jarak antar baris tendon } y_d' &= \frac{ns \times y_e}{\Sigma ni} \\
 &= \frac{62 \times 0,659}{107} \\
 &= 0,3819 \text{ m}
 \end{aligned}$$

5.4.5 Eksentrisitas, Lintasan dan Tata Letak Tendon

Jumlah dan baris tendon pada perhitungan ini didasarkan pada kondisi eksisting dan sudah sesuai. Untuk selanjutnya, eksentrisitas, lintasan, dan tata letak tendon digunakan sesuai kondisi eksisting, yang dapat dilihat pada Gambar 5.13 Layout tendon dan Gambar 5.14 Titik koordinat tendon. Untuk lebih jelas nya Gambar dapat dilihat pada bagian lampiran 1.



Gambar 5.14 Layout Tendon

Tendon	Type	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	...
C1	12 Ø15,2 mm	75 mm	Y	1500	1500
		75 mm	Z	1500	1500
		75 mm	Y	1500	1500
C2	17 Ø15,2 mm	95 mm	Y	1500	1500
		95 mm	Z	1500	1500
		95 mm	Y	1500	1500
C3	19 Ø15,2 mm	95 mm	Y	1500	1500
		95 mm	Z	1500	1500
		95 mm	Y	1500	1500
C4	19 Ø15,2 mm	95 mm	Y	1500	1500
		95 mm	Z	1500	1500
		95 mm	Y	1500	1500

Gambar 5.15 Titik Koordinat Tendon

5.5 Kehilangan Gaya Prategang (*Loss of Prestress*) pada *Cable*

Gaya prategang pada tendon dapat berkurang setelah proses penegangan dilakukan. Penurunan gaya ini disebut kehilangan gaya prategang (*loss of prestress*). Kehilangan gaya prategang perlu dihitung untuk mengetahui gaya prategang efektif yang masih bekerja pada kabel. Perhitungan ini didasarkan terhadap beberapa faktor penyebabnya, diantaranya *anchorage friction*, *jack friction*, *elastic shortening*, *anchoring*, dan *relaxation of tendon*.

5.5.1 Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Angkur (*Anchorage Friction*)

Kehilangan gaya prategang akibat gesekan pada angkur terjadi selama proses penegangan tendon. Kehilangan ini diasumsikan sebesar 3% dari gaya prategang akibat *jacking*. Besarnya gaya prategang akibat *jacking* adalah sebesar $P_j = 9493,42$ kN.

Gaya prategang setelah kehilangan akibat gesekan angkur:

$$\begin{aligned}
 P_o &= 0,97 \times P_j \\
 &= 0,97 \times 9493,42 \\
 &= 9208,62 \text{ kN.}
 \end{aligned}$$

5.5.2 Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Tendon (*Jack Friction*)

$$\text{Eksentrisitas tendon } e_s = 0,854 \text{ m}$$

$$\text{Panjang bentang } L = 40,8 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Koefisien alfa } \alpha &= \frac{8 \times e_s}{l} \\
 &= \frac{8 \times 0,854}{40,8} \\
 &= 0,1675 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

$$\text{Koefisien gesek } \mu = 0,2 \text{ (NAASRA Bridge Design specification)}$$

$$\text{Koefisien wobble } \beta = 0,0012 \text{ (NAASRA Bridge Design specification)}$$

Bilangan Euler	e	$= 2,7183$
Gaya prategang angkur	P_o	$= 9208,62 \text{ kN}$
LOP gesekan kabel	P_x	$= P_o * e^{-\mu * (\alpha + \beta * L_x)}$
Untuk L_x 20,40 m		$= 9208,62 * 2,7183^{-0,2 * (0,1675 + 0,0012 * 20,40)}$
		$= 8843,16 \text{ kN}$
Untuk L_x 40,80 m		$= 9208,62 * 2,7183^{-0,2 * (0,1675 + 0,0012 * 40,80)}$
		$= 8799,96 \text{ kN}$

5.5.3 Kehilangan Gaya Prategang akibat Pemendekan Elastis (*Elastic Shortening*)

Eksentrisitas tendon	e_s	$= 0,854 \text{ m}$
Momen inersia penampang	I_x	$= 0,414 \text{ m}$
Luas penampang balok	A	$= 0,6783 \text{ m}^2$
Modulus elastisitas beton	E_{beton}	$= 35,700,000 \text{ kPa}$
Modulus elastisitas baja	E_s	$= 195,000,000 \text{ kPa}$
Jumlah <i>strands</i>	n_s	$= 62 \text{ strands}$
Luas satu <i>strand</i>	A_{st}	$= 0,00014 \text{ m}^2$
Beban putus satu <i>strand</i>	P_{bs}	$= 260 \text{ kN}$
Momen akibat berat sendiri	M_{balok}	$= 3599,09 \text{ kNm}$
Luas total tendon	A_t	$= n_s \times A_{st}$
		$= 62 \times 0,00014$
		$= 0,000868 \text{ m}^2$
Rasio modulus elastisitas	n	$= \frac{E_s}{E_{\text{beton}}}$
		$= \frac{195,000,000}{35,700,000}$
		$= 5,467$

$$\begin{aligned}
 \text{Jari-jari inersia penampang } i &= \sqrt{\frac{Ix}{A}} \\
 &= \sqrt{\frac{0,414}{0,6783}} \\
 &= 0,781 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Koefisien elastisitas } Ke &= \frac{At}{A} \left(1 + \frac{es^2}{i^2}\right) \\
 &= 0,0281
 \end{aligned}$$

Tegangan baja prategang sebelum *loss of prestress* (di tengah bentang):

$$\begin{aligned}
 \sigma_{pi} &= \frac{ns \times Pbs}{At} \\
 &= \frac{62 \times 260}{0,00868} \\
 &= 1857143 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Kehilangan tegangan akibat regangan elastis (dengan pengaruh berat sendiri):

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_{pe'} &= \frac{\sigma_{pi} \times n \times Ke}{1 + n \times Ke} \\
 &= \frac{1857143 \times 5,467 \times 0,0276}{1 + 5,467 \times 0,0276} \\
 &= 247196 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Tegangan beton pada level baja akibat gaya prategang:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{bt} &= \frac{\Delta\sigma_{pe'}}{n} - \frac{M_{balok} \times es}{Ix} \\
 &= \frac{247196}{5,467} - \frac{3599,09 \times 0,854}{0,414} \\
 &= 37795 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Kehilangan tegangan akibat regangan elastis (tanpa pengaruh berat sendiri):

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_{pe} &= \frac{1}{2} \times n \times \sigma_{bt} \\
 &= \frac{1}{2} \times 5,467 \times 37795 \\
 &= 103307 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Kehilangan gaya prategang akibat pemendekan elastis:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_e &= \Delta\sigma_{pe} \times At \\
 &= 103307 \times 0,00868 \\
 &= 896,71 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

5.5.4 Kehilangan Gaya Prategang akibat Pengangkuran (*Anchoring*)

Panjang tarik masuk berkisar 2-7 mm diambil 2 mm

$$\text{Panjang tarik masuk} \quad \Delta L = 0,002 \text{ m}$$

$$\text{Modulus elastisitas baja} \quad E_s = 195,000,000 \text{ kPa}$$

$$\text{Luas tampang tendon baja} \quad A_t = 0,000868 \text{ m}^2$$

$$\text{Gaya prategang awal} \quad P_o = 9208,62 \text{ kN}$$

$$\text{Gaya prategang gesekan} \quad P_x = 8799,96 \text{ kN}$$

$$\text{Jarak ujung ke titik tinjau} \quad L_x = 40,80 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Kemiringan diagram gaya} \quad m &= \frac{P_o - P_x}{L_x} \\ &= \frac{9208,62 - 8799,96}{40,80} \\ &= 10,016 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jarak pengaruh slip ankur} \quad L_{\max} &= \sqrt{\frac{\Delta L \times E_s \times A_t}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{0,002 \times 195,000 \times 0,0086}{10,016}} \\ &= 18,3842 \text{ m} \end{aligned}$$

Kehilangan gaya prategang akibat ankur:

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{Angkur}} &= L_{\max} \times m \\ &= 18,3842 \times 10,016 \\ &= 184,137 \text{ kN} \end{aligned}$$

Gaya prategang efektif setelah kehilangan ankur:

$$\begin{aligned} P' &= P_o - \Delta P \\ &= 9208,62 - 184,137 \\ &= 9024 \text{ kN} \end{aligned}$$

Gaya prategang maksimum setelah seluruh kehilangan

$$\begin{aligned} P_{\max} &= P' - \Delta P_e \\ &= 9024 - 896,71 \\ &= 8128 \text{ kN} \end{aligned}$$

5.5.5 Kehilangan Gaya Prategang akibat *Relaxation of Tendon*

1. Pengaruh susut (*Shrinkage*)

$$\text{Regangan dasar susut } \epsilon_b = 0,0006 \text{ (NAASRA Bridge Design Specification)}$$

$$\text{Koefisien pemakaian semen } k_b = 0,905 \text{ (NAASRA Bridge Design Specification)}$$

$$\text{Luas penampang balok } A = 0,6783 \text{ m}^2$$

$$\text{Keliling penampang } k = 5,700 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Tebal teoritis penampang } e_m &= \frac{2A}{K} \\ &= \frac{2 \times 0,6783}{5,700} \\ &= 0,238 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\text{Koefisien tebal teoritis } k_e = 0,734 \text{ (NAASRA Bridge Design Specification)}$$

$$\text{Persentase luas tulangan } p = 0,50\%$$

$$\begin{aligned} \text{Koefisien luas tulangan } k_p &= \frac{100}{100+20 \times p} \\ &= \frac{100}{100+20 \times 0,50\%} \\ &= 0,999 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Regangan susut } \Delta \epsilon_{su} &= \epsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p \\ &= 0,0006 \times 0,905 \times 0,734 \times 0,999 \\ &= 0,00039816 \end{aligned}$$

$$\text{Modulus elastis baja } E_s = 195,000,000 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan susut } \sigma_{sh} &= \Delta \epsilon_{su} \times E_s \\ &= 0,00039816 \times 195,000,000 \\ &= 77641,95 \text{ kPa} \end{aligned}$$

2. Pengaruh rayapan (*Creep*)

$$\begin{aligned} \text{Saat transfer tengah bentang } P_i &= P_x - \Delta P_e \\ &= 8861,82 - 896,71 \end{aligned}$$

$$= 7965,11 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan awal beban putus strand} &= \frac{P_i}{n_s \times P_{bs}} \\ &= \frac{7965,11}{62 \times 260} \\ &= 49,41\% \text{ UTS} \end{aligned}$$

$$\text{Momen berat sendiri balok} \quad M_{\text{balok}} = 3599,1 \text{ kNm}$$

$$\text{Modulus serat atas} \quad W_a = 0,3795$$

$$\text{Modulus serat bawah} \quad W_b = 0,410$$

$$\text{Modulus elastisitas beton} \quad E_{\text{balok}} = 35,700,000 \text{ kPa}$$

$$\text{Eksentrisitas tendon} \quad e_s = 0,85403 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang balok} \quad A = 0,6783 \text{ m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan beton serat atas} \quad f_a &= \frac{P_i}{A} - \frac{P_i \times e_s}{W_a} + \frac{M_{\text{balok}}}{W_a} \\ &= \frac{7965,11}{0,6783} - \frac{7965,11 \times 0,854}{0,3795} + \frac{3599,1}{0,3795} \\ &= -3302,55 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan beton serat bawah} \quad f_b &= \frac{P_i}{A} - \frac{P_i \times e_s}{W_b} + \frac{M_{\text{balok}}}{W_b} \\ &= \frac{7965,11}{0,6783} - \frac{7965,11 \times 0,854}{0,410} + \frac{3599,1}{0,410} \\ &= -19549,17 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Pada kondisi udara yang tergolong kering, yaitu saat kelembaban relatif kurang dari 50%, nilai koefisien berdasarkan NAASRA Bridge Specification.

$$\text{Koefisien kelembaban udara} \quad k_c = 3$$

$$\text{Koefisien pemakaian semen} \quad k_b = 0,905$$

$$\text{Jumlah hari pengerasan} \quad t = 28 \text{ hari}$$

Temperatur udara rata-rata	$T_{\text{udara}} = 27,5^{\circ}\text{C}$
Umur pengerasan beton	$t' = \frac{(T+10)}{30} \times t$ $= \frac{(27,5+10)}{30} \times 28$ $t' = 35 \text{ hari}$
Koefisien pengerasan beton	$k_d = 0,938$ (NAASRA Bridge Design Specification)
Tebal teoritis	$e_m = 0,238 \text{ m}$
Koefisien tebal teoritis	$k_e = 0,734$ (NAASRA Bridge Design Specification)
Koefisien umur beton	$k_{tn} = 0,2$
Tegangan beton untuk creep	$f_c = f_b$ $= 19549,17 \text{ kPa}$
Regangan akibat creep	$\epsilon_{cr} = \left(\frac{f_c}{E_{balok}} \right) \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_{tn}$ $= \left(\frac{19549,17}{35.700.000} \right) \times 0,905 \times 3 \times 0,938 \times 0,734 \times 0,2$ $= 0,00020$
Tegangan akibat creep	$\sigma_{cr} = \epsilon_{cr} \times E_s$ $= 0,00020 \times 195.000$ $= 39920 \text{ kPa}$
Tegangan susut	$\sigma_{sh} = 77641,95 \text{ kPa}$
Total kehilangan tegangan	$\Delta\sigma_{sc} = \sigma_{cr} + \sigma_{sh}$ $= 39920 + 77641,95$ $= 117562,22 \text{ kPa}$
Tegangan awal prategang	$\sigma_{pi} = \frac{p_i}{A_t}$

$$= \frac{7965,11}{0,00868}$$

$$= 917639,624 \text{ kPa}$$

$$\text{Besar tegangan terhadap UTS} = 49,41\% \text{ UTS}$$

Hubungan nilai X terhadap besar tegangan UTS:

$$X = 0 \text{ Jika } \sigma_{pi} < 50\% \text{ UTS}$$

$$X = 1 \text{ Jika } \sigma_{pi} = 50\% \text{ UTS}$$

$$X = 2 \text{ Jika } \sigma_{pi} = 70\% \text{ UTS}$$

$$\text{Nilai X} = 0,97$$

Relaksasi setelah 1000 jam pada 70% beban putus

$$C_{rel} = 2,50\%$$

$$\begin{aligned} \text{Tegangan relaksasi } \sigma_r &= X \times C_{rel} \times (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_{sc}) \\ &= 0,97 \times 2,50\% \times (917639,62 - 117562,22) \\ &= 19401,877 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Loss of prestress jangka panjang} &= \Delta\sigma_{sc} + \sigma_r \\ &= 117562,22 + 19401,877 \\ &= 136964,10 \text{ kPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kehilangan gaya prategang } \Delta p &= (\Delta\sigma_{sc} + \sigma_r) \times A_t \\ &= (117562,22 + 19401,877) \times 0,00868 \\ &= 1188,848 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Gaya efektif di tengah bentang } p_{eff} &= P_i - \Delta p \\ &= 7965,11 - 1188,848 \\ &= 6776,26 \text{ kN} \end{aligned}$$

Kehilangan gaya prategang total:

$$\begin{aligned} &\left(1 - \frac{P_{eff}}{P_j}\right) \times 100\% \\ &\left(1 - \frac{6776,26}{9493,42}\right) \times 100\% = 28,6\% \end{aligned}$$

5.6 Pengaruh Jumlah *Strands* terhadap Faktor-faktor yang Mempengaruhi Kehilangan Gaya Prategang

Berdasarkan contoh perhitungan pada Bab 5.5, rekapitulasi hasil perhitungan untuk variasi jumlah *strands* 46 hingga 62 disajikan pada tabel-tabel berikut.

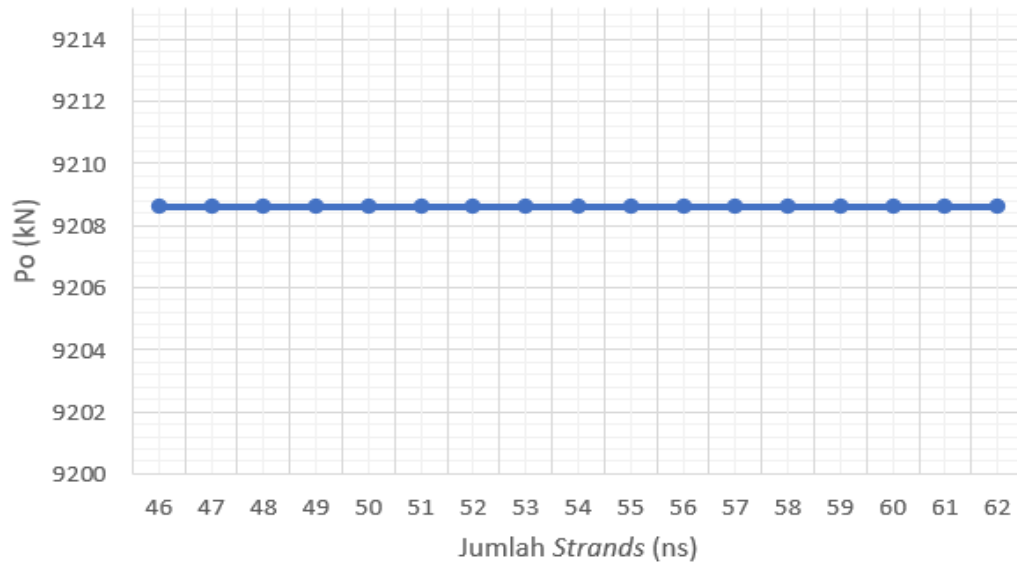
5.6.1 Gesekan Angkur (*Anchorage Friction*)

Rekapitulasi hasil perhitungan kehilangan gaya prategang akibat gesekan angkur (*Anchorage Friction*) dari jumlah strands 46 hingga 62 dapat dilihat pada Tabel 5.13 berikut ini.

Tabel 5.13 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Angkur

No	Jumlah strands (ns)	Po (kN)
1	46	9208,62
2	47	9208,62
3	48	9208,62
4	49	9208,62
5	50	9208,62
6	51	9208,62
7	52	9208,62
8	53	9208,62
9	54	9208,62
10	55	9208,62
11	56	9208,62
12	57	9208,62
13	58	9208,62
14	59	9208,62
15	60	9208,62
16	61	9208,62
17	62	9208,62

Dari Tabel 5.13 di atas didapatkan Gambar 5.15 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Angkur sebagai berikut.



Gambar 5.16 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Angkur

Berdasarkan Tabel 5.13 dan Gambar 5.15, kehilangan gaya akibat gesekan angkur pada penelitian ini dihitung sebesar 3% dari gaya prategang saat *jacking*. Karena persentase kehilangan yang digunakan sama pada setiap variasi jumlah *strands*, maka besarnya kehilangan gaya prategang yang diperoleh menunjukkan nilai yang sama. Grafik memperlihatkan pola yang sama pada setiap variasi, yang menandakan bahwa pada tahap ini kehilangan gaya belum dipengaruhi oleh perubahan jumlah *strands*, tetapi mengikuti asumsi awal perhitungan yang telah ditetapkan. Kondisi ini masih sejalan dengan penjelasan Federal Highway Administration yang menyatakan bahwa setelah gaya *jacking* maksimum tercapai, tegangan dipindahkan ke sistem angkur di ujung aktif, dan pada tahap tersebut dapat terjadi kehilangan akibat *anchorage set* atau *seating* pada *wedge*. Dengan demikian, penggunaan nilai 3% dalam penelitian ini dapat dipahami sebagai bentuk penyederhanaan untuk mewakili kehilangan awal akibat gesekan angkur sebelum dilanjutkan ke faktor kehilangan lainnya.

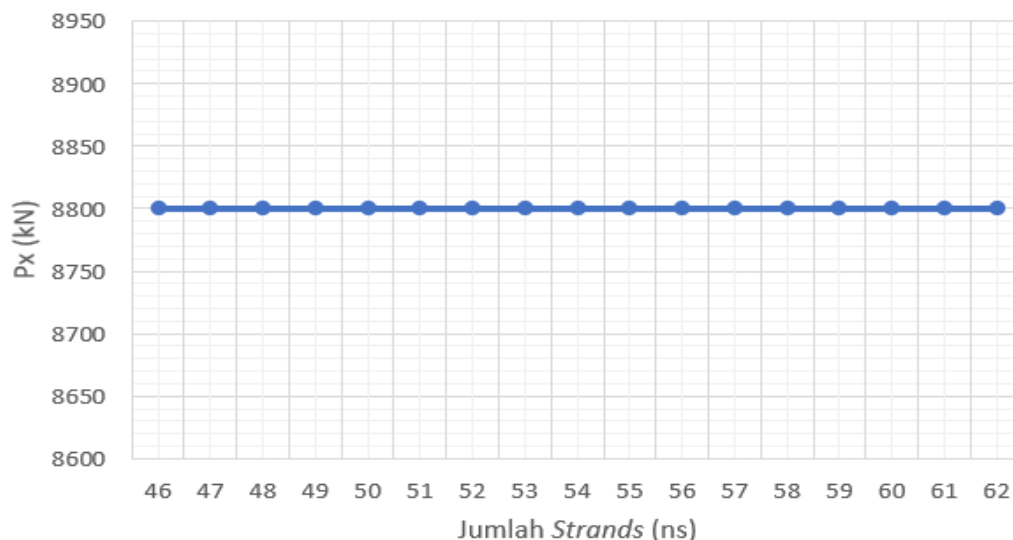
5.6.2 Gesekan Tendon (*Jack Friction*)

Perhitungan kehilangan gaya prategang akibat gesekan tendon pada variasi jumlah *strands* 46 sampai 62 dengan panjang tendon 40,80 m dapat dilihat pada Tabel 5.14 berikut.

Tabel 5.14 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Tendon

No	Jumlah <i>Strands</i> (ns)	P _x (kN)
1	46	8799,96
2	47	8799,96
3	48	8799,96
4	49	8799,96
5	50	8799,96
6	51	8799,96
7	52	8799,96
8	53	8799,96
9	54	8799,96
10	55	8799,96
11	56	8799,96
12	57	8799,96
13	58	8799,96
14	59	8799,96
15	60	8799,96
16	61	8799,96
17	62	8799,96

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 5.14, grafik kehilangan gaya prategang akibat gesekan tendon dengan panjang tendon 40,80 m dapat dilihat pada Gambar 5.16 berikut.



Gambar 5.17 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Gesekan Tendon

Berdasarkan Tabel 5.14 dan Gambar 5.16, kehilangan gaya prategang akibat gesekan tendon pada jumlah *strands* 46 sampai 62 menunjukkan nilai yang tetap, yaitu sebesar 8799,96 kN. Hasil ini menunjukkan bahwa variasi jumlah *strands* pada faktor ini belum memberikan pengaruh terhadap besar kehilangan gaya prategang. Hal ini terjadi karena kehilangan gaya akibat gesekan tendon lebih dipengaruhi oleh beberapa parameter lain, seperti panjang tendon, koefisien gesek, koefisien *wobble*, dan kondisi lintasan tendon, bukan hanya jumlah *strands* yang digunakan. Dalam penelitian ini, panjang tendon yang digunakan pada perhitungan adalah 40,80 m, sehingga selama parameter-parameter tersebut tidak berubah, hasil kehilangan gaya yang diperoleh juga cenderung sama. Secara teori, kehilangan gaya akibat gesekan tendon terjadi karena adanya gesekan antara tendon dan selubungnya saat proses penegangan berlangsung, sehingga besar kehilangan gaya dipengaruhi oleh kondisi tendon pada saat ditarik Post-tensioning Institute (PTI).

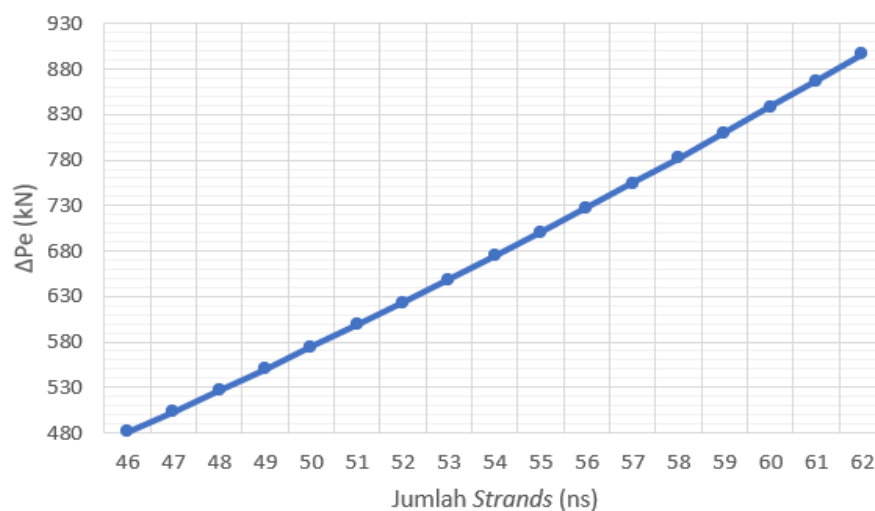
5.6.3 Pemendekan Elastis (*Elastic Shortening*)

Besarnya kehilangan gaya prategang yang disebabkan oleh pemendekan elastis (*elastic shortening*) pada variasi jumlah *strands* 46 sampai dengan 62 dapat dilihat pada Tabel 5.15 berikut ini.

Tabel 5.15 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Pemendekan Elastis

No	Jumlah <i>Strands</i> (ns)	ΔP_e (kN)
1	46	480,89
2	47	503,52
3	48	526,60
4	49	550,14
5	50	574,15
6	51	598,60
7	52	623,51
8	53	648,86
9	54	674,66
10	55	700,90
11	56	727,58
12	57	754,69
13	58	782,24
14	59	810,22
15	60	838,62
16	61	867,45
17	62	896,71

Data kehilangan gaya prategang akibat pemendekan elastis (*elastic shortening*) pada Tabel 5.15 kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.17 agar pola perubahannya dapat diamati dengan lebih jelas. Grafik dapat dilihat pada Gambar 5.17 di bawah ini.



Gambar 5.18 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Pemendekan Elastis

Berdasarkan Tabel 5.12 dan Gambar 5.17 Grafik kehilangan gaya prategang akibat pemendekan elastis (*elastic shortening*) meningkat seiring dengan bertambahnya jumlah *strands*. Semakin banyak *strands* yang digunakan, maka gaya prategang yang bekerja pada beton juga semakin besar (Nawy, Lin.Y.T & Burns). Hal ini menyebabkan tegangan tekan pada beton saat transfer ikut meningkat, sehingga pemendekan elastis beton menjadi lebih besar (FHWA 2003). Akibatnya, regangan tendon berkurang dan kehilangan gaya prategang juga semakin besar (Preston dkk., 1975). Dari perhitungan, terlihat bahwa peningkatan jumlah *strands* dari 46 ke 62 menyebabkan ΔP_e meningkat sekitar 86%, yang menunjukkan bahwa penambahan jumlah *strands* secara signifikan memengaruhi kehilangan gaya prategang. Maka dari itu, penggunaan jumlah *strands* perlu direncanakan agar kehilangan gaya prategang tetap terkendali.

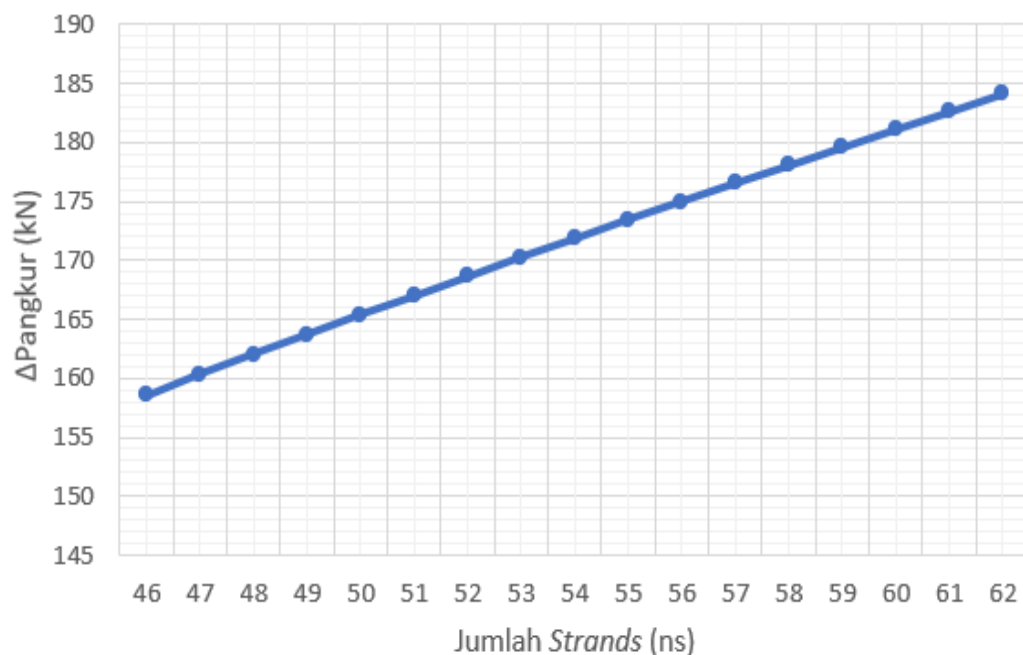
5.6.4 Pengangkuran (*Anchoring*)

Kehilangan gaya prategang akibat pengangkuran pada variasi jumlah *strands* 46 sampai dengan 62 dapat dilihat pada Tabel 5.16 berikut ini.

Tabel 5.16 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Pengangkuran

No	Jumlah <i>Strands</i> (ns)	ΔP_{Angkur} (kN)
1	46	158,61
2	47	160,32
3	48	162,02
4	49	163,70
5	50	165,36
6	51	167,01
7	52	168,63
8	53	170,25
9	54	171,85
10	55	173,43
11	56	175,00
12	57	176,56
13	58	178,10
14	59	179,63
15	60	181,14
16	61	182,65
17	62	184,14

Data pada Tabel 5.16, kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik agar perubahan nilainya lebih mudah diamati. Grafik dapat dilihat pada Gambar 5.18 berikut.



Gambar 5.19 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat Pengangkuran

Berdasarkan Tabel 5.16 dan Gambar 5.18, dapat dilihat bahwa variasi jumlah *strands* berpengaruh terhadap besarnya kehilangan gaya prategang akibat pengangkuran. Nilai ΔP_{Angkur} meningkat dari 158,61 kN pada jumlah *strands* 46 menjadi 184,14 kN pada jumlah *strands* 62, dengan peningkatan sebesar 16%. Peningkatan tersebut terlihat pada grafik yang menunjukkan pola meningkat secara bertahap atau cenderung linear. Hal ini terjadi karena semakin banyak jumlah *strands*, maka luas total baja prategang semakin besar, sehingga gaya total akibat pengangkuran juga meningkat. Kehilangan akibat pengangkuran terjadi saat *strands* yang telah dikunci angkur, sehingga timbul pergeseran yang dapat mempengaruhi gaya prategang. Kim dkk. (2022) menjelaskan bahwa *anchorage seating loss* yaitu kehilangan yang terjadi saat sistem angkur mengunci *strands* setelah gaya *jacking* dilepaskan, sedangkan menurut Naaman & Siriakson (1993),

kehilangan akibat pengangkuran termasuk dalam kehilangan seketika pada beton pascatarik. Dengan demikian, semakin banyak jumlah *strands* yang digunakan, maka kehilangan gaya prategang akibat pengangkuran juga semakin besar.

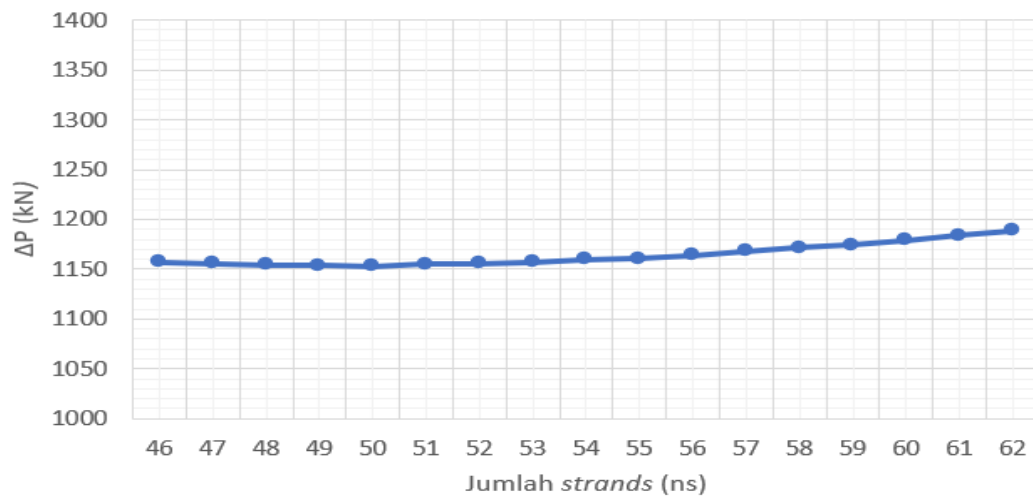
5.6.5 *Relaxation of Tendon*

Kehilangan gaya prategang akibat *Relaxation of Tendon* pada variasi jumlah *strands* 46 sampai dengan 62 dapat dilihat pada Tabel 5.17 berikut ini.

Tabel 5.17 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang akibat Relaxation of Tendon

No	Jumlah <i>Strands</i> (ns)	ΔP (kN)
1	46	1156,76
2	47	1155,51
3	48	1154,32
4	49	1153,58
5	50	1153,09
6	51	1154,89
7	52	1155,80
8	53	1156,77
9	54	1159,62
10	55	1160,69
11	56	1163,61
12	57	1168,36
13	58	1171,34
14	59	1174,36
15	60	1179,17
16	61	1184,00
17	62	1188,85

Data pada Tabel 5.17 kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik agar perubahan nilainya lebih mudah diamati. Grafik dapat dilihat pada Gambar 5.19 berikut.



Gambar 5.20 Grafik Kehilangan Gaya Prategang akibat *Relaxation of Tendon*

Berdasarkan Tabel 5.17 dan Gambar 5.19 di atas, kehilangan gaya prategang akibat *relaxation of tendon* menunjukkan nilai yang relatif stabil, tetapi tetap menunjukkan pola peningkatan seiring bertambahnya jumlah *strands*. Pada jumlah 46 *strands*, nilai kehilangan gaya prategang sebesar 1156,76 kN. Nilai tersebut sempat mengalami penurunan kecil pada beberapa variasi awal, kemudian meningkat secara bertahap hingga mencapai 1188,85 kN pada jumlah 62 *strands*. Peningkatan dari 46 *strands* ke 62 *strands* adalah sebesar 3%, sehingga perubahan nilai kehilangan gaya prategang akibat *relaxation of tendon* dapat dikatakan relatif kecil. Pola ini menunjukkan bahwa jumlah *strands* berpengaruh terhadap kehilangan gaya prategang, meskipun peningkatannya relatif kecil. Hal tersebut sesuai dengan konsep bahwa *relaxation of tendon* dipengaruhi oleh tegangan awal tendon, waktu, temperatur, dan karakteristik material baja prategang (Walter Podolny & Thomas Melville, 1969). Oleh karena itu, meskipun penambahan *strands* dapat meningkatkan gaya prategang awal, kehilangan akibat *relaxation of tendon* juga perlu diperhitungkan agar gaya prategang efektif yang bekerja pada struktur masih memenuhi kebutuhan desain dan tidak mengganggu kinerja layan struktur beton prategang, seperti kemampuan menahan beban, mengontrol retak, dan mempertahankan lendutan dalam batas yang aman (Swartz dkk., 2012).

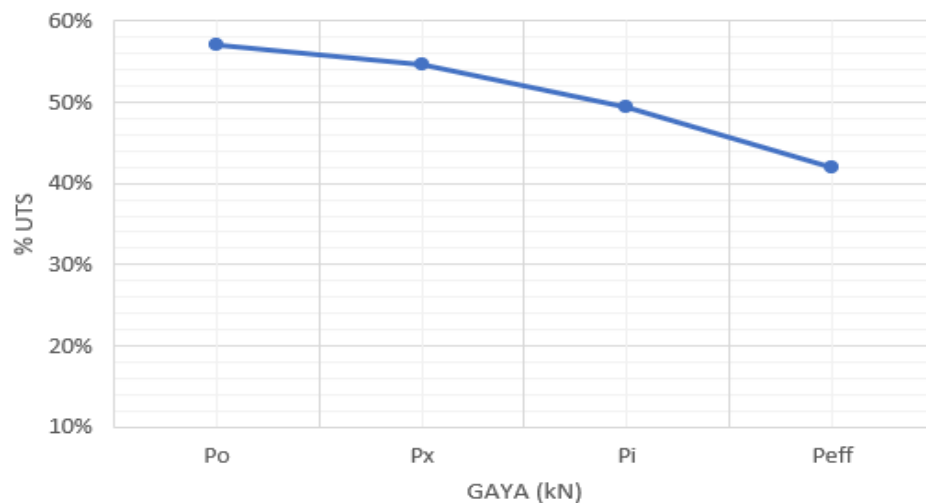
5.6.6 Jumlah *Strands* pada Beton Prategang dan Hubungannya dengan Kehilangan Gaya Prategang

Terdapat beberapa faktor kehilangan gaya prategang akibat variasi jumlah *strands* yang perlu diperhitungkan dalam analisis beton prategang. Faktor-faktor tersebut meliputi kehilangan akibat gesekan angkur (*anchorage friction*), gesekan tendon (*jack friction*), pemendekan elastis (*elastic shortening*), pengangkuran (*anchoring*), *relaxation of tendon*. Perhitungan analisis kehilangan gaya prategang sudah dilakukan pada subab 5.5 dengan mempertimbangkan faktor-faktor tersebut. Tabel 5.18 adalah rekapitulasi hasil analisis kehilangan gaya prategang total pada jumlah *strands* eksisting.

Tabel 5.18 Rekapitulasi Hasil Analisis Kehilangan Gaya Prategang Total pada Jumlah *Strands* Eksisting.

Gaya	kN	<i>Loss of Prestress</i>	% UTS
Po	9208,62	Angkur	57%
Px	8799,96	<i>Jack Friction</i>	55%
Pi	7965,11	<i>Relaxation of tendon</i>	49%
Peff	6776,26		42%
<i>Loss of Prestress</i>		28,6%	

Berdasarkan Tabel 5.18 , terlihat bahwa gaya prategang mengalami penurunan pada setiap tahap perhitungan kehilangan gaya prategang. Gaya awal prategang sebesar 9208,62 kN berkurang menjadi 6776,26 kN setelah memperhitungkan beberapa faktor kehilangan. Agar perubahan nilai tersebut lebih mudah dipahami, hasil rekapitulasi pada tabel kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik pada Gambar 5.20 berikut.



Gambar 5.21 Grafik Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang

Berdasarkan Tabel 5.18 dan Gambar 5.20, dapat dilihat bahwa gaya prategang mengalami penurunan secara bertahap dari P_o sampai P_{eff} . Pada tahap awal, gaya prategang P_o memiliki nilai sebesar 9208,62 kN. Setelah dilakukan perhitungan terhadap kehilangan gaya prategang, nilainya menurun menjadi 8799,96 kN pada P_x , kemudian menjadi 7965,11 kN pada P_i , dan akhirnya menjadi 6776,26 kN pada P_{eff} . Penurunan ini menunjukkan bahwa gaya prategang yang diberikan pada awal penarikan tendon tidak sepenuhnya menjadi gaya efektif yang bekerja pada beton prategang.

Pada Gambar 5.15, pola penurunan tersebut juga terlihat cukup jelas melalui grafik. Persentase gaya terhadap UTS mengalami penurunan dari 57% pada P_o menjadi 55% pada P_x . Selanjutnya, nilai tersebut kembali turun menjadi 49% pada P_i dan menjadi 42% pada P_{eff} . Hal ini menunjukkan bahwa setiap faktor kehilangan gaya prategang yang diperhitungkan akan mengurangi besarnya gaya prategang yang tersisa pada struktur. Sehingga didapatkan *loss of prestress* sebesar 28,6%.

Terjadinya penurunan gaya prategang tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti gesekan pada tendon, pengangkur, pemendekan elastis, serta relaksasi tendon. Hal ini sejalan dengan penjelasan (ACI Comittee 423, 2016) yang menyebutkan bahwa kehilangan gaya prategang dapat disebabkan oleh *friction*, *elastic shortening*, *creep shrinkage*, dan *relaxation of tendons*. Selain itu, (Podolny,

1969) juga menjelaskan bahwa kehilangan gaya prategang dapat terjadi akibat relaksasi baja, susut beton, deformasi elastis, rangkai beton, slip ankur, dan gesekan tendon.

Dari hasil tersebut, dapat dipahami bahwa P_{eff} merupakan nilai gaya prategang akhir dalam analisis beton prategang. Nilai ini menunjukkan besarnya gaya prategang yang masih bekerja secara efektif setelah seluruh kehilangan diperhitungkan. Oleh karena itu, perhitungan kehilangan gaya prategang perlu dilakukan dengan baik. Apabila kehilangan gaya prategang tidak diperhitungkan dengan baik, maka gaya efektif yang bekerja pada struktur dapat menjadi lebih kecil dari yang direncanakan dan berpengaruh terhadap kemampuan beton prategang dalam menerima beban.

Nilai *loss of prestress* sebesar 28,6% menunjukkan bahwa kehilangan gaya prategang total yang terjadi dari P_o sampai P_{eff} masih cukup dekat dengan estimasi awal. Persentase ini diperoleh dari perbandingan antara gaya prategang yang hilang terhadap gaya prategang awal, sehingga menunjukkan bahwa gaya prategang efektif yang tersisa sudah memperhitungkan seluruh faktor kehilangan yang terjadi. Dengan demikian, hasil perhitungan ini dapat dikatakan cukup mendekati estimasi awal kehilangan gaya prategang akhir, yaitu sekitar 30%. Hal ini menunjukkan bahwa nilai P_{eff} sebesar 6776,26 kN masih dapat digunakan sebagai gaya prategang efektif dalam analisis selanjutnya, karena besar kehilangan gaya prategang yang terjadi masih berada pada kisaran yang telah diperkirakan sebelumnya.

Berdasarkan hasil perhitungan dan pembahasan sebelumnya, diperoleh rekapitulasi hasil analisis kehilangan gaya prategang total terhadap variasi jumlah *strands* dapat dilihat pada Tabel 5.19 berikut.

Tabel 5.19 Rekapitulasi Hasil Analisis Kehilangan Gaya Prategang Total terhadap Variasi Jumlah Strands.

Jumlah Strands	% UTS				<i>Loss of Prestress</i>
	P_o	P_x	P_i	P_{eff}	
46	77%	74%	70%	60%	23,9%
47	75%	72%	68%	59%	24,1%
48	74%	71%	67%	58%	24,4%

**Lanjutan Tabel 5.19 Rekapitulasi Hasil Analisis Kehilangan Gaya
Prategang Total terhadap Variasi Jumlah Strands.**

Jumlah Strands	% UTS				Loss of Prestress
	Po	Px	Pi	Peff	
49	72%	69%	65%	56%	24,6%
50	71%	68%	64%	55%	24,8%
51	69%	66%	62%	54%	25,1%
52	68%	65%	61%	52%	25,4%
53	67%	64%	60%	51%	25,7%
54	66%	63%	58%	50%	26,0%
55	64%	62%	57%	49%	26,3%
56	63%	60%	56%	48%	26,6%
57	62%	59%	55%	47%	26,9%
58	61%	58%	54%	46%	27,2%
59	60%	57%	52%	45%	27,6%
60	59%	56%	51%	44%	27,9%
61	58%	55%	50%	43%	28,3%
62	57%	55%	49%	42%	28,6%

Dari data yang disajikan pada Tabel 5.19, nilai *loss of prestress* cenderung mengalami peningkatan seiring dengan bertambahnya jumlah *strands*. Pada variasi jumlah *strands* 46 sampai 62, persentase kehilangan gaya prategang total berada pada kisaran 23,9% hingga 28,6%. kehilangan gaya prategang terendah terjadi pada variasi 46 *strands*, yaitu sebesar 23,9%, sedangkan kehilangan tertinggi terjadi pada variasi 62 *strands*, yaitu sebesar 28,6%. kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan jumlah *strands* berpengaruh terhadap meningkatnya kehilangan gaya prategang total.

Peningkatan nilai *loss of prestress* ini menjadi hal yang cukup penting untuk dibahas karena semakin besar kehilangan gaya prategang, maka gaya prategang efektif yang tersisa pada girder akan semakin berkurang. Gaya prategang efektif memiliki peran penting dalam membantu girder menahan tegangan tarik, mengontrol terjadinya retak, serta mengurangi lendutan. Meskipun demikian, pada hasil analisis ini peningkatan *loss of prestress* masih tergolong aman atau tidak terlalu besar. Nilai kehilangan gaya prategang total masih berada pada rentang

23,9% sampai 28,6%, sehingga masih mendekati estimasi awal perencanaan sebesar 30%. peningkatan nilai *loss of prestress* akibat variasi jumlah *strands* masih dapat dikatakan wajar dan terkendali.

Kenaikan nilai *loss of prestress* pada tabel tersebut juga tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Rata-rata peningkatan kehilangan gaya prategang total pada setiap penambahan jumlah *strands* hanya sekitar 1,1%. Nilai tersebut masih berada di bawah 2% sehingga pengaruh penambahan jumlah *strands* terhadap kenaikan kehilangan gaya prategang total dapat dikatakan relatif kecil. Dengan demikian, meskipun jumlah *strands* mengalami penambahan, peningkatan kehilangan gaya prategang total masih berada dalam batas yang mendekati asumsi awal perencanaan.

Secara teknis, kehilangan gaya prategang merupakan hal umum yang terjadi pada beton prategang. Kehilangan tersebut dapat disebabkan oleh beberapa faktor, seperti pemendekan elastis beton, rangkai beton, susut beton, relaksasi baja prategang, friksi, dan kedudukan angkur atau *anchore seating* (ACI Comitte 423, 2016). Faktor-faktor tersebut menyebabkan gaya prategang awal yang diberikan saat proses *stressing* tidak seluruhnya tersisa sebagai gaya prategang efektif pada girder.

Pada kondisi aktual di lapangan, PCI girder pada proyek Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1 menggunakan 62 *strands*. Berdasarkan hasil analisis, jumlah *strands* tersebut menghasilkan nilai *loss of prestress* sebesar 28,6%. Nilai ini masih mendekati estimasi awal kehilangan gaya prategang sebesar 30%, sehingga hasil perhitungan dapat dikatakan sesuai dengan asumsi awal perencanaan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kehilangan gaya prategang yang terjadi tidak menyimpang jauh dari estimasi awal.

Penggunaan 62 *strands* tetap di pertahankan karena penentuan jumlah *strands* tidak hanya didasarkan pada persentase *loss of prestress*, tetapi juga mempertimbangkan gaya prategang efektif, kapasitas struktur, kontrol tegangan, lendutan, dan keamanan girder.

Nilai *loss of prestress* perlu diperhitungkan karena berkaitan langsung dengan kinerja girder pada saat masa layan. Jika kehilangan gaya prategang yang terjadi

lebih kecil dari asumsi desain, maka gaya prategang efektif yang tersisa pada girder dapat menjadi lebih besar dari nilai yang direncanakan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan peningkatan *camber* atau lendutan balik pada girder. Apabila *camber* yang terjadi terlalu besar, maka hal ini dapat berpengaruh terhadap pekerjaan struktur di atasnya, terutama pada pelat lantai maupun lapisan *rigid*. Tardos et al menjelaskan bahwa perkiraan kehilangan gaya prategang yang kurang tepat dapat mengakibatkan gaya prategang efektif menjadi terlalu besar, sehingga *camber* dan pemendekan girder juga mengalami peningkatan (Tadros dkk., 2003).

Sebaliknya, apabila nilai *loss of prestress* terlalu besar atau melebihi asumsi desain, maka gaya prategang efektif yang tersisa akan semakin kecil. Kondisi ini dapat menurunkan kemampuan girder dalam menahan tegangan tarik akibat beban layan. Akibatnya, risiko retak pada girder dapat meningkat, terutama pada daerah serat tarik. (Tadros dkk., 2003) Menyatakan bahwa kehilangan gaya prategang yang lebih besar dari perkiraan dapat menyebabkan gaya prategang efektif menjadi lebih kecil, sehingga risiko retak pada girder saat menerima beban layan penuh dapat meningkat .

Pada hasil analisis ini, nilai *loss of prestress* terbesar adalah 28,6%. Nilai tersebut mendekati estimasi awal sebesar 30%, sehingga hasil analisis masih dapat dikatakan aman dan mendekati asumsi awal perencanaan. Dalam kondisi tertentu, masalah pada proses *stressing* juga dapat meningkatkan risiko kerusakan pada *strands*. Oleh karena itu, pelaksanaan proses *stressing* yang tepat dan pengecekan kehilangan gaya prategang perlu dilakukan agar gaya prategang efektif tetap sesuai dengan kebutuhan desain.

Secara keseluruhan, hasil pada Tabel 5.19 menunjukkan bahwa variasi jumlah *strands* 46 sampai 62 menghasilkan nilai *loss of prestress* yang masih relatif terkendali. Rentang kehilangan sebesar 23,9% sampai 28,6% masih dekat dengan estimasi awal sekitar 30%. Selain itu, rata-rata peningkatan sebesar 1,1% menunjukkan bahwa penambahan jumlah *strands* tidak memberikan peningkatan kehilangan gaya prategang total yang besar. Penggunaan 62 *strands* juga tetap relevan karena merupakan jumlah *strands* aktual yang digunakan di lapangan pada proyek Jalan Tol Yogyakarta-Bawen Paket 1 Seksi 1.

Selain membahas besarnya nilai *loss of prestress* total, pembahasan selanjutnya dilakukan terhadap faktor-faktor penyebab kehilangan gaya prategang. Pembahasan ini bertujuan untuk mengetahui faktor mana saja yang dipengaruhi oleh variasi jumlah *strands* dan faktor mana yang tidak dipengaruhi. Pembagian faktor tersebut dapat dilihat pada Tabel 5.20 Faktor kehilangan gaya prategang sebagai berikut.

Tabel 5.20 Faktor Kehilangan Gaya Prategang

No	Faktor kehilangan	Pengaruh jumlah <i>strands</i>	Persentase kenaikan
1	Angkur (<i>Anchorage Friction</i>)	Tidak berpengaruh	0%
2	Gesekan Tendon (<i>Jack Friction</i>)	Tidak berpengaruh	0%
3	Pemendekan Elastis (<i>ELastic Shortening</i>)	Berpengaruh	86%
4	Pengangkuran (<i>Anchoring</i>)	Berpengaruh	16%
5	<i>Relaxation of Tendon</i>	Berpengaruh	3%

Berdasarkan Tabel 5.20, dapat dilihat bahwa tidak semua faktor kehilangan gaya prategang dipengaruhi oleh variasi jumlah *strands*. Faktor ankur atau *anchorage friction* pada analisis ini tidak berpengaruh oleh jumlah *strands*, karena kehilangan pada bagian ini lebih dipengaruhi oleh sistem ankur, posisi baji, dan proses pemindahan gaya dari dongkrak ke ankur. Jadi, selama sistem ankur yang digunakan tetap sama, perubahan jumlah *strands* tidak memberikan pengaruh terhadap faktor ini. Hal ini sejalan dengan (ACI Comittee 423, 2016) yang menjelaskan bahwa kehilangan prategang pada sistem pascatarik dapat terjadi akibat *anchorage seating* dan proses transfer gaya pada perangkat ankur.

Faktor gesekan tendon atau *jack friction* tidak berpengaruh terhadap variasi jumlah *strands*. Hal ini karena kehilangan akibat gesekan lebih berkaitan dengan alat penarikan, kondisi dongkrak, serta lintasan tendon, bukan hanya dari banyaknya *strands*. Selama alat dan metode penarikan yang digunakan sama, maka perubahan jumlah *strands* tidak terlalu mempengaruhi kehilangan pada faktor ini.

(Podolny, 1969) menjelaskan bahwa kehilangan akibat gesekan tendon merupakan salah satu kehilangan prategang yang dipengaruhi oleh kondisi sistem penarikan dan lintasan tendon.

Sementara itu, faktor pemendekan elastis atau *elastic shortening* berpengaruh terhadap jumlah *strands*. Semakin banyak jumlah *strands*, maka gaya prategang total yang diberikan pada beton juga semakin besar. Akibatnya, beton mengalami pemendekan elastis yang besar dan menyebabkan sebagian gaya pada tendon berkurang. (ACI Comitte 423, 2016) menjelaskan bahwa pemberian gaya prategang dapat menyebabkan beton memendek, sehingga terjadi kehilangan pada tendon.

Faktor pengangkuran atau *anchoring* juga berpengaruh terhadap jumlah *strands*, karena semakin banyak *strands* yang digunakan, maka gaya yang harus ditahan oleh sistem angkur menjadi lebih besar. Kondisi ini dapat mempengaruhi besarnya kehilangan akibat slip atau pergeseran kecil pada angkur. Selain faktor *anchoring*, kehilangan gaya prategang juga dipengaruhi oleh *relaxation of tendon*. Berdasarkan hasil analisis sebelumnya, kehilangan gaya prategang akibat *relaxation of tendon* mengalami peningkatan yang relatif kecil meskipun jumlah *strands* bertambah. Hal ini menunjukkan bahwa *relaxation of tendon* berpengaruh terhadap kehilangan gaya prategang, tetapi peningkatannya tidak terlalu besar. Secara keseluruhan, besarnya kehilangan gaya prategang tidak hanya ditentukan oleh jumlah *strands* tetapi dapat disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk *anchorage slip*, gesekan tendon, deformasi elastis, susut, rangkak, dan relaksasi baja prategang (Podolny, 1969).

Dengan demikian, faktor yang tidak berpengaruh terhadap variasi jumlah *strands* adalah *anchorage friction* dan *jack friction*, karena lebih dipengaruhi oleh alat, sistem angkur dan proses penarikan. Adapun faktor yang berpengaruh adalah *elastic shortening*, *anchoring*, dan *relaxation of tendon*, karena ketiganya berkaitan dengan besarnya gaya prategang total yang bekerja pada beton dan tendon.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pembahasan pada bab sebelumnya, maka dari penelitian ini didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Jumlah *strands* berpengaruh terhadap total kehilangan gaya prategang pada balok beton prategang tipe PCI Girder. Hal ini dapat dilihat dari meningkatnya nilai *loss of prestress* ketika jumlah *strands* bertambah. Pada variasi 46 *strands*, nilai kehilangan gaya prategang total sebesar 23,9%, sedangkan pada variasi 62 *strands*, nilai kehilangan gaya prategang total meningkat menjadi 28,6%. Meskipun terjadi peningkatan, peningkatan tersebut tidak terlalu besar karena rata-rata peningkatannya hanya sekitar 1,1% setiap kenaikan *strands*. Nilai kehilangan terbesar juga cukup mendekati estimasi awal kehilangan gaya prategang sebesar 30%. Dengan demikian, jumlah *strands* berpengaruh terhadap total kehilangan gaya prategang pada PCI Girder, tetapi pengaruhnya tidak signifikan.
2. Parameter kehilangan gaya prategang yang paling terpengaruh oleh variasi jumlah *strands* adalah *elastic shortening*, *anchoring*, dan *relaxation of tendon*. Rentang kehilangan masing-masing adalah 86% untuk *elastic shortening*, 16% untuk *anchoring*, dan 3% untuk *relaxation of tendon*. Ketiga faktor ini dipengaruhi langsung oleh besar gaya yang bekerja pada beton dan tendon. Sementara itu, *anchorage friction* dan *jack friction* tidak terpengaruh secara signifikan karena lebih bergantung pada alat, sistem angkur, kondisi friksi, dan proses penarikan. Dari ketiganya, *elastic shortening* memberikan pengaruh terbesar, sehingga menjadi faktor utama yang perlu diperhatikan dalam perencanaan jumlah *strands*.

6.2 Saran

Dari hasil analisis yang diperoleh, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya maupun pelaksanaan pekerjaan PCI Girder, sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan untuk meninjau parameter lain selain jumlah *strands*, seperti mutu beton, panjang bentang girder, umur beton saat *stressing*, dan eksentrisitas tendon.
2. Pada pekerjaan PCI Girder, proses *stressing* perlu dikontrol dengan baik, terutama pada alat *jacking*, sistem angkur, urutan penarikan, dan pembacaan elongasi *strand*. Hal ini penting agar kehilangan gaya prategang tetap sesuai dengan rencana desain dan tidak mengganggu kinerja girder.
3. Penelitian ini belum membahas kapasitas lentur dan lendutan balok. Maka, pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan perhitungan kapasitas lentur dan lendutan balok secara menyeluruh, sehingga kinerja struktur dapat dievaluasi lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Comitte 423. (2016). *Guide to Estimating Prestress Loss*. American Concrete Institute.
- Arga Rumbyarso, Y. P. (2024). *Buku Ajar Struktur Beton Prestress*.
www.freepik.com
- Aulia, A. P., & Hardawati, A. (2026). Analisis Pengaruh Jumlah Strand Terhadap Persentase Jacking Force. *Proceeding Civil Engineering Research Forum*, 5(2).
- Badan Standardisasi Nasional. (2004). *RSNI T-12-2004 Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan*.
- Digo, M., & Juliafad, E. (2023). *Perencanaan Alternatif Tendon Prategang dengan Variasi Tata Letak Tendon dan Mutu Tendon Pada Struktur Tas Jembatan Batang Lasi Kota Sawah Lunto* (Vol. 4, Nomor 3).
- Federal Highway Administration. (2024). TechBrief: Long-Term Monitoring of Post-Tensioning Tendon Force Using Optical Fiber Technology. *Tech Brief (FHWA-HOF-24-085)*. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/75679>
- Jepriani, S., Susanto, W., & Suryono, J. (2022). Studi Alternatif Loss of Prestress PC I Girder Akibat Metode Single Stressing dan Double Stressing Pada Section Overpass STA 52+174 Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda. *Jurnal Teknik Sipil*, 29(2), 133–144. <https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.2.4>
- Kautsar Darojatun, B., & Nuranita, B. (2024). *Kajian Analisis Struktur PC-I Girder Prestressed pada Jembatan Bentang 35,8 meter*.
<https://doi.org/10.26760/rekaracana>
- Kim, S. H., Park, S. Y., Kim, S. T., & Jeon, S. J. (2022). Analysis of Short-Term Prestress Losses in Post-tensioned Structures Using Smart Strands. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(1).
<https://doi.org/10.1186/s40069-021-00488-3>
- Lin.Y.T, & Burns, H. (1988). *Desaian Struktur Beton Prategang Edisi Ketiga Jilid 1*.

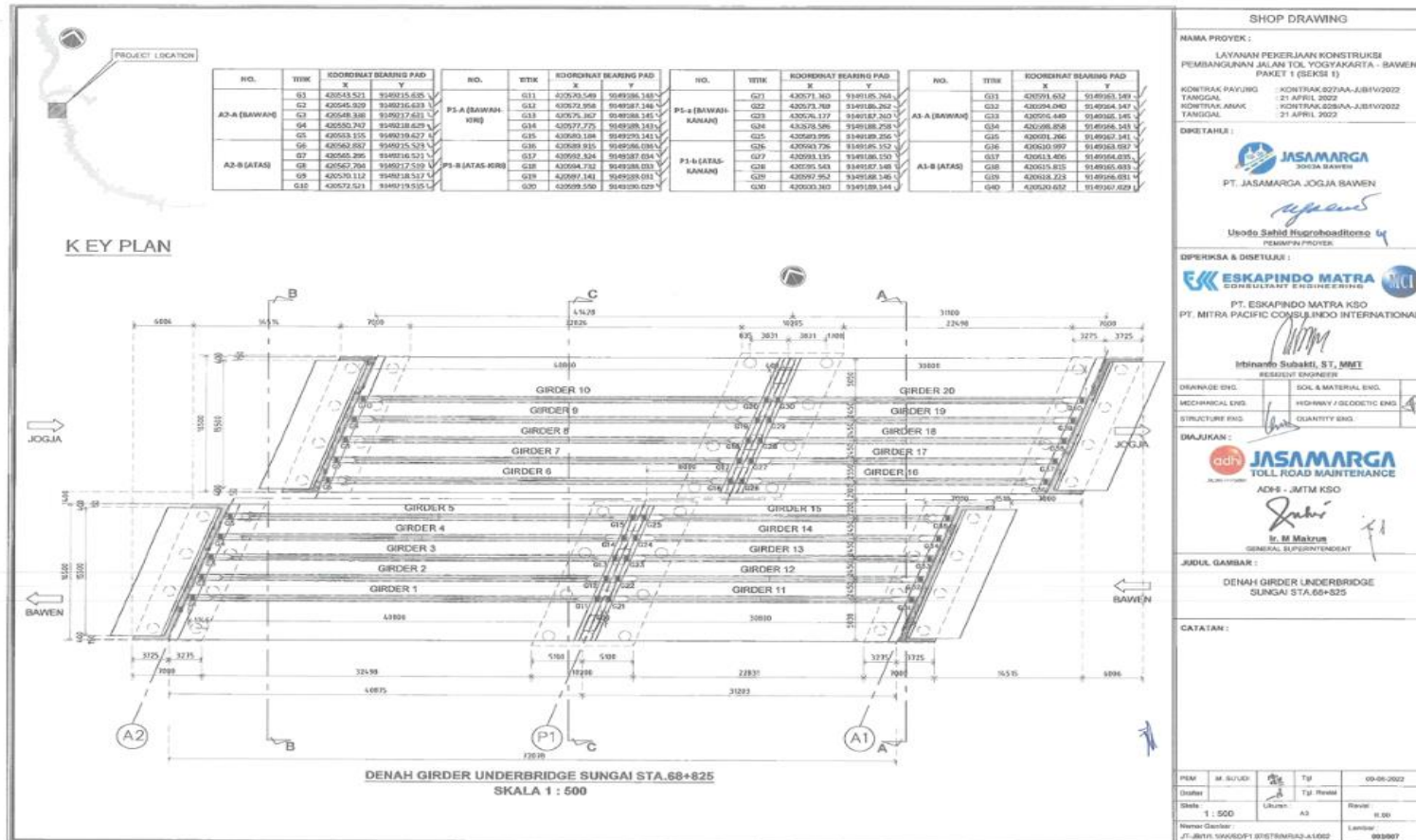
- Naaman, A. E., & Siriakson, A. (1993). *Serviceability Based Design of Partially Prestressed Beams*.
- Nawy. (2001). *Beton Prategang Edisi Ketiga Jilid 1*.
- Podolny, W. J. (1969). Understanding The Losses In Prestressing. *PCI Journal*.
- Post-tensioning Institute (PTI). (t.t.). *Post-Tensioning Institute (PTI)*.
- Preston, H. K., Barker, J. M., Boecker, H. C., Dull, R. G., Edwards, H. H., Huang, T. I., Iragorri, J., Kastent, R. O., Koretzky, H. P., Kraemer, P. E., Magura\$, D. D., Preece, F. R., Suarez, M. G., & Zia, P. (1975). *Recommendations for Estimating Prestress Losses*.
- Sari, N. P., Irwan, I., & Hermansyah, H. (2022a). Analisis Kehilangan Gaya Prategang Girder Pada Jembatan Proyek Pembangunan Jalan Tol Tebing Tinggi – Inderapura. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Arsitektur (JITAS)*, 1(2), 112–117. <https://doi.org/10.31289/jitas.v1i2.1456>
- Sari, N. P., Irwan, I., & Hermansyah, H. (2022b). Analisis Kehilangan Gaya Prategang Girder Pada Jembatan Proyek Pembangunan Jalan Tol Tebing Tinggi – Inderapura. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil dan Arsitektur (JITAS)*, 1(2), 112–117. <https://doi.org/10.31289/jitas.v1i2.1456>
- SNI 1725:2016. (2016). *Pembebanan untuk Jembatan Badan Standardisasi Nasional*. www.bsn.go.id
- Supriyadi, B., & Muntohar, S. (2017). *Jembatan*.
- Swartz, B. D., Scanlon, A., & Schokker, A. J. (2012). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications Provisions for Loss of Prestress. *Fall 2012 | PCI Journal*, 108.
- Tadros, M. K., AL-Omaishi, N., Seguirant, S. J., & Gallt, J. G. (2003). *Prestress Losses in Pretensioned High-Strength Concrete Bridge Girders*. www.TRB.org
- Tumpu, M., & Rusan Rangan, P. (2020). *Struktur Beton Prategang (Teori dan Prinsip Desain)*. <https://www.researchgate.net/publication/357576126>
- Ulandari, P., Suhendra, & Zulfiati, R. (2021). Analisis Perbandingan Kehilangan Gaya Prategang pada Jembatan Fly Over Metode Stressing Satu Arah dan

Dua Arah. *Jurnal Talenta Sipil*, 4(2), 200.
<https://doi.org/10.33087/talentasipil.v4i2.75>

Walter Podolny, J., & Thomas Melville. (1969). *Understanding The Relaxation In Prestressing*.

LAMPIRAN

Lampiran I Detail Engineering Desain



Gambar L-1.1 *Detail Engineering Desain*