

TUGAS AKHIR

**PERENCANAAN BOX GIRDER PRATEGANG UNTUK
JEMBATAN KERETA API**

**Diajukan untuk Memenuhi Persyaratan dalam Menyelesaikan
Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung**



Disusun Oleh :

**Abel Juan Savero
NIM : 30201900010**

**Aditya Zidan Syauqi
NIM : 30201900019**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG**

2023

LEMBAR PENGESAHAN

PERENCANAAN BOX GIRDER PRATEGANG UNTUK JEMBATAN KERETA API



Abel Juan Savero

NIM : 30201900010



Aditya Zidan Syauqi

NIM : 30201900019

Telah disetujui dan disahkan di Semarang, 24 Juli 2023

Tim Penguji

Tanda Tangan

1. **Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.**

NIDN: 0605046703

2. **Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng.**

NIDN: 0625059102

3. **Lisa Fitriyana, S.T., M.Eng.**

NIDN: 0631128901

Ketua Program Studi Teknik Sipil

Fakultas Teknik

Universitas Islam Sultan Agung

Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng.

NIDN: 0625059102

BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR

No: 15 / A. 2 / SA - T / IX / 2022

Pada hari ini tanggal 24 Juli 2023 berdasarkan surat keputusan Dekan Fakultas Teknik, Universitas Islam Sultan Agung perihal penunjukan Dosen Pembimbing Utama dan Dosen Pembimbing Pendamping:

1. Nama : Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.
Jabatan Akademik : Guru Besar
Jabatan : Dosen Pembimbing Utama
2. Nama : Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng.
Jabatan Akademik : Lektor
Jabatan : Dosen Pembimbing Pendamping

Dengan ini menyatakan bahwa mahasiswa yang tersebut di bawah ini telah menyelesaikan bimbingan Tugas Akhir:

Abel Juan Savero.
NIM : 30201900010

Aditya Zidan Syauqi.
NIM : 30201900019

Judul : Perencanaan Box Girder Prategang Untuk Jembatan Kereta Api

Dengan tahapan sebagai berikut :

No	Tahapan	Tanggal	Keterangan
1	Penunjukan dosen pembimbing	21 - 09 - 2022	ACC
2	Seminar Proposal	01 - 11 - 2022	
3	Pengumpulan data	21 - 11 - 2022	
4	Analisis data	14 - 12 - 2022	
5	Penyusunan laporan	14 - 12 - 2022	ACC
6	Selesai laporan	18 - 07 - 2023	

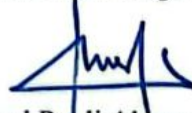
Demikian Berita Acara Bimbingan Tugas Akhir / Skripsi ini dibuat untuk diketahui dan dipergunakan seperlunya oleh pihak-pihak yang berkepentingan

Dosen Pembimbing Utama



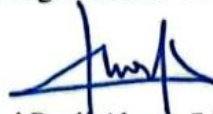
Prof. Dr. Ir. Antonius, MT.

Dosen Pembimbing Pendamping



Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng.

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Sipil



Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng.

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Kami yang bertanda tangan di bawah ini :

1. NAMA : Abel Juan Savero
NIM : 30201900010
2. NAMA : Aditya Zidan Syauqi
NIM : 30201900019

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang berjudul :
“PERENCANAAN BOX GIRDER PRATEGANG UNTUK JEMBATAN
KERETA API”
benar bebas dari plagiat, dan apabila pernyataan ini terbukti tidak benar maka kami
bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini kami buat untuk dipergunakan sebagaimana
mestinya.

Semarang, 20 Juli 2023

Yang membuat pernyataan,

Yang membuat pernyataan,

Abel Juan Savero
NIM : 30201900010

Aditya Zidan Syauqi
NIM : 30201900019



PERNYATAAN KEASLIAN

Kami yang bertanda tangan dibawah ini:

1. NAMA : Abel Juan Savero
NIM : 30201900010
2. NAMA : Aditya Zidan Syauqi
NIM : 30201900019

JUDUL TUGAS AKHIR : Perencanaan Box Girder Prategang Untuk Jembatan Kereta Api

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tugas Akhir ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli kami sendiri. Kami tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan - bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijasah pada Universitas Islam Sultan Agung Semarang atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka kami bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Islam Sultan Agung Semarang.

Demikian pernyataan ini kami buat.

Semarang, 20 Juli 2023

Yang membuat pernyataan, Yang membuat pernyataan,

Abel Juan Savero
NIM : 30201900010

Aditya Zidan Syauqi
NIM : 30201900019



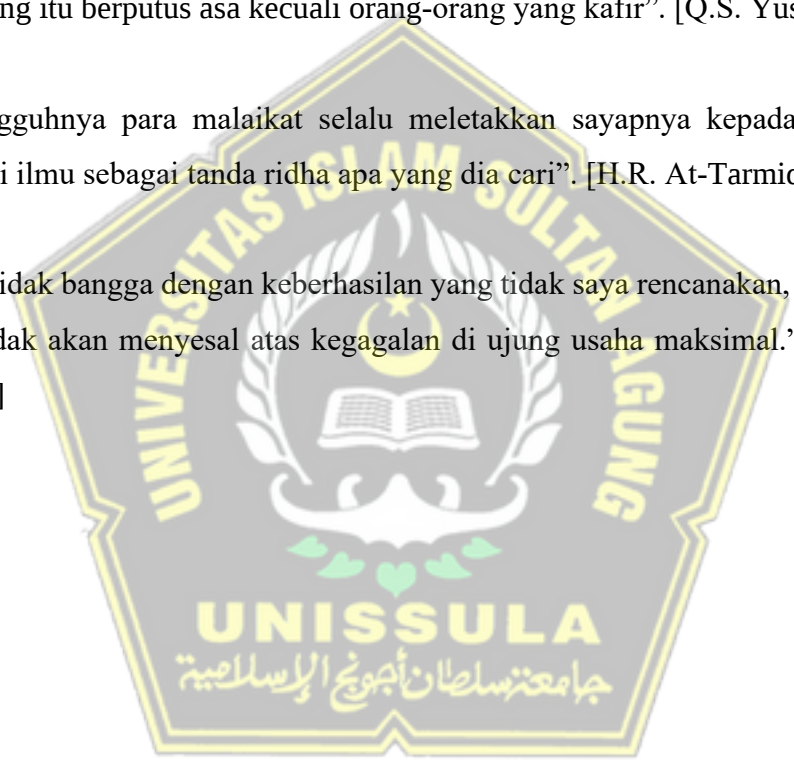
MOTTO

“Kamu adalah umat terbaik yang dilahirkan untuk manusia, menyuruh yang makruf, dan mencegah dari yang mungkar, dan beriman kepada Allah. Sekiranya Ahli kitab beriman, tentulah itu lebih baik bagi mereka. Di antara mereka ada yang beriman, namun kebanyakan mereka adalah orang-orang fasik”. [Q.S. Ali Imron : 110]

“Dan janganlah kamu berputus asa dari rahmat Allah. Sesungguhnya tidaklah seseorang itu berputus asa kecuali orang-orang yang kafir”. [Q.S. Yusuf : 87]

“Sesungguhnya para malaikat selalu meletakkan sayapnya kepada orang yang mencari ilmu sebagai tanda ridha apa yang dia cari”. [H.R. At-Tarmidzi : 3535]

“Saya tidak bangga dengan keberhasilan yang tidak saya rencanakan, sebagaimana saya tidak akan menyesal atas kegagalan di ujung usaha maksimal.”. [Harun Al-Rasyid]



PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga Penulis bisa menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Jaswanto dan Ibu Eko Juniati Purwaningtyas, atas semua cinta, pengertian, kasih sayang, kesabaran, dan do'a.
2. Dosen-dosen UNISSULA Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil yang telah membagikan ilmu.
3. Bapak Dosen Pembimbing Prof. Dr. Ir. Antonius, MT. dan Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng. yang dengan sabar membimbing dalam pengerjaan Tugas Akhir kami.
4. Aditya Zidan Syauqi rekan tugas, teman seperjuangan, teman sepermainan, dan saudara seiman.
5. Teman Teknik Sipil se-Angkatan 2019 yang telah memberikan dukungan dan semangat.
6. Teman-teman Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil dan seluruh Mahasiswa Teknik UNISSULA.

Abel Juan Savero

NIM : 30201900010

PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, Puji Syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, sehingga Penulis bisa menyelesaikan Laporan Tugas Akhir ini. Laporan Tugas Akhir ini Penulis persembahkan untuk :

1. Kedua orang tua tercinta Bapak Chrisna Junianto dan Ibu Isnaniyah, atas semua cinta, pengertian, kasih sayang, kesabaran, dan do'a.
2. Dosen-dosen UNISSULA Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil yang telah membagikan ilmu.
3. Bapak Dosen Pembimbing Prof. Dr. Ir. Antonius, MT. dan Muhamad Rusli Ahyar, S.T., M.Eng. yang dengan sabar membimbing dalam pengerjaan Tugas Akhir kami.
4. Abel Juan Savero rekan tugas, teman seperjuangan, teman sepermainan, dan saudara seiman.
5. Teman Teknik Sipil se-Angkatan 2019 yang telah memberikan dukungan dan semangat.
6. Teman-teman Fakultas Teknik Jurusan Teknik Sipil dan seluruh Mahasiswa Teknik UNISSULA.

Aditya Zidan Syauqi

NIM : 30201900019

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmatNya sehingga Penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Perencanaan Box Girder Prategang Untuk Jembatan Kereta Api” guna memenuhi salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Sipil pada Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung.

Penulis menyadari kelemahan serta keterbatasan yang ada sehingga dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini memperoleh bantuan dari berbagai pihak, dalam kesempatan ini Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak Ir. H. Rachmat Mudiyo, M.T., Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Islam Sultan Agung Semarang.
2. Bapak Muhamad Rusli Ahyar, ST.,M.Eng. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan kelancaran pelayanan dalam urusan Akademik.
3. Prof. Dr. Ir. Antonius, MT. selaku Dosen Pembimbing Utama yang selalu memberikan waktu bimbingan dan arahan selama penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Muhamad Rusli Ahyar, ST.,M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang selalu memberikan waktu bimbingan dan arahan selama penyusunan tugas akhir ini.
5. Seluruh Dosen Program Studi Teknik Sipil UNISSULA yang telah memberikan ilmunya kepada Penulis.
6. *Partner* pengerjaan Tugas Akhir yang selalu bekerjasama sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai tepat pada waktunya.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan baik isi maupun susunannya. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat tidak hanya bagi Penulis juga bagi para Pembaca.

Semarang,

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
BERITA ACARA BIMBINGAN TUGAS AKHIR	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
PERNYATAAN KEASLIAN.....	v
MOTTO	vi
PERSEMBAHAN.....	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR NOTASI.....	xviii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xxii
ABSTRAK.....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Maksud dan Tujuan.....	2
1.4. Batasan Masalah.....	2
1.5. Manfaat Penulisan.....	3
1.6. Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Tinjauan Umum	4
2.2. Jembatan Tipe Box Girder	4
2.3. Beton Prategang.....	5
2.3.1. Konsep Prategang.....	5
2.3.2. Metode Sistem Prategang.....	6
2.3.3. Material Beton Prategang.....	8

2.3.4. Baja Prategang.....	9
2.3.5. Tegangan Ijin Beton	14
2.3.6. Tegangan Ijin Tendon	14
2.3.7. Perhitungan Gaya Prategang	15
2.3.8. Tahap Pembebanan Beton Prategang	15
2.3.9. Eksentrisitas	16
2.3.10. Tata Letak Tendon	16
2.3.11. Kehilangan Gaya Prategang.....	17
2.4. Pembebanan Pada Jembatan Kereta Api.....	23
2.4.1. Beban Mati	23
2.4.2. Beban Hidup.....	27
2.4.3. Gaya Rem	29
2.4.4. Beban Angin.....	29
2.4.5. Pengaruh Temperatur	30
2.4.6. Beban Gempa	30
2.4.7. Lendutan.....	30
2.5. Pilar Jembatan.....	33
2.6. Pondasi	34
2.7. Metode Balanced Cantilever.....	36
 BAB III METODOLOGI.....	 38
3.1. Tinjauan Umum.....	38
3.2. Tahap Perencanaan	38
3.2.1. Pengumpulan Data	38
3.2.2. Studi Literatur	39
3.2.3. Preliminary Design.....	39
3.2.4. Perhitungan Pembebanan	39
3.2.5. Perhitungan dan Analisis Struktur.....	40
3.2.6. Penggambaran Struktur	40
3.3. Pemodelan Desain Struktur.....	40
3.4. Diagram Alir	40

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1. Perencanaan Tinggi Box Girder	42
4.2. Data Struktur Atas	43
4.3. Properties Penampang Box Girder	44
4.4. Analisis Pembebanan	49
4.4.1. Berat Sendiri Balok Prategang (MSB)	49
4.4.2. Berat Sendiri	49
4.4.3. Beban Mati Tambahan (MA)	50
4.4.4. Beban Lajur (TD)	52
4.4.5. Gaya Rem (TB)	55
4.4.6. Beban Angin (EW)	55
4.4.7. Pengaruh Temperatur (ET)	57
4.4.8. Beban Gempa (EQ)	59
4.5. Kombinasi Pembebanan	62
4.6. Gaya Prategang, Eksentrisitas dan Jumlah Tendon	71
4.6.1. Kondisi Awal Gaya Prategang	71
4.6.2. Kondisi Akhir Gaya Prategang	73
4.6.3. Pembesian Box Girder	75
4.6.4. Posisi Tendon	77
4.6.5. Lintasan Inti Tendon	81
4.6.6. Sudut Angkur	82
4.6.7. Tata Letak dan Trace Kabel	85
4.6.8. Kehilangan Tegangan (<i>Loss of Prestress</i>)	90
4.6.9. Tegangan Akibat Prategang	97
4.6.10. Tegangan Pada Balok komposit Akibat Beban Kombinasi	99
4.6.11. Kontrol Lendutan Balok Terhadap Kombinasi	102
4.6.12. Perencanaan Pilar	108
4.6.13. Perhitungan Pondasi	113
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 123
5.1. Kesimpulan	124
5.2. Saran	125

DAFTAR PUSTAKA	xxv
LAMPIRAN.....	xxvii



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. <i>Tipe baja prategang</i>	10
Tabel 2.2. <i>Wire strand (stress relieved)</i>	13
Tabel 2.3. <i>Steel wire “Uncoated stress relieved”</i>	13
Tabel 2.4. <i>Steel bar “Smooth alloyed steel bar</i>	13
Tabel 2.5. Koefisien gesek, μ	18
Tabel 2.6. Koefisien wobble, β	19
Tabel 2.7. Regangan dasar susut ϵ_b	21
Tabel 2.8. Kelas jalan untuk lebar jalan rel 1067 mm	24
Tabel 2.9. Kelas jalan untuk lebar jalan rel 1435 mm	24
Tabel 2.10. Dimensi penampang rel	26
Tabel 2.11. Dimensi bantalan beton.....	27
Tabel 2.12. Lendutan maksimum yang diijinkan.....	31
Tabel 4.1. H_{tafsiran} tiap segmen	43
Tabel 4.2. Dimensi pembagian penampang box girder	45
Tabel 4.3. Perhitungan momen inersia	47
Tabel 4.4. Rekap berat sendiri (Q_{MS})	50
Tabel 4.5. Rekap beban mati tambahan (Q_{MA})	52
Tabel 4.6. Kecepatan angin rencana	56
Tabel 4.7. Koefisien seret	56
Tabel 4.8. Pengaruh temperatur	58
Tabel 4.9. Koefisien F_a	59
Tabel 4.10. Koefisien F_v	59
Tabel 4.11. Zona gempa	60
Tabel 4.12. Faktor modifikasi respon (R)	60
Tabel 4.13. Faktor beban	62
Tabel 4.14. Persamaan momen dan gaya geser	63
Tabel 4.15. Momen pada balok prategang	63
Tabel 4.16. Gaya geser pada balok prategang	65
Tabel 4.17. Bidang momen pada balok akibat beban kombinasi	67
Tabel 4.18. Bidang geser pada balok akibat beban kombinasi	69

Tabel 4.19. Mutu baja baja <i>strands</i> standar VSL	73
Tabel 4.20. Rencana jumlah tendon dan strands	74
Tabel 4.21. Posisi tendon di tengah bentang dan tumpuan	80
Tabel 4.22. Lintasan inti tendon	81
Tabel 4.23. Sudut angkur	84
Tabel 4.24. Tata letak dan trace kabel pada bentang 0 - 40 m	85
Tabel 4.25. Tata letak dan trace kabel pada bentang 40 - 80 m.....	87
Tabel 4.26. Kontrol lendutan	107
Tabel 4.27. Design Factor For Safety	119



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Single-Cell Box Girder Cross Section</i>	4
Gambar 2.2. <i>Multi-Cell Box Girder Cross Section</i> ,	5
Gambar 2.3. Metode pelaksanaan pra-tarik	7
Gambar 2.4. Metode pelaksanaan pasca-tarik.....	8
Gambar 2.5. <i>7-wire monostrand</i> tendon	11
Gambar 2.6. <i>Multistrand</i> tendon	11
Gambar 2.7. <i>Single bar</i> tendon	11
Gambar 2.8. <i>Multi-wire</i> tendon.....	11
Gambar 2.9. Tendon bonded.....	12
Gambar 2.10. Tendon unbonded.....	12
Gambar 2.11. Koefisien k_b	22
Gambar 2.12. Koefisien k_e	22
Gambar 2.13. Penampang rel	25
Gambar 2.14. Beban angin pada kereta api	29
Gambar 2.15. Diagram alir perancangan jembatan terhadap beban gempa	32
Gambar 2.16. Jenis pilar (pier)	33
Gambar 2.17. Diagram interaksi kekuatan gaya aksial-momen pada kolom ..	34
Gambar 2.18. Pondasi bore pile	35
Gambar 2.19. Tahap pelaksanaan jembatan metode <i>balanced cantilever</i>	37
Gambar 3.1. Diagram alir perencanaan jembatan kereta api <i>box girder</i>	41
Gambar 4.1. Pemodelan jembatan tiap segmen	42
Gambar 4.2. Penampang box girder	44
Gambar 4.3. Properties penampang box girder	44
Gambar 4.4. Penampang bagian 1	45
Gambar 4.5. Beban berat sendiri (MS)	49
Gambar 4.6. Dimensi bantalan kereta api	51
Gambar 4.7. Penampang rel	52
Gambar 4.8. Skema pembebanan dengan kereta yang banyaknya tidak tertentu	53
Gambar 4.9. Skema beban berjalan	53

Gambar 4.10. Garis pengaruh momen terbesar	53
Gambar 4.11. Garis pengaruh lintang	54
Gambar 4.12. Beban angin	56
Gambar 4.13. Pengaruh temperatur	57
Gambar 4.14. Beban gempa	61
Gambar 4.15. Tegangan pada box girder	72
Gambar 4.16. Pembesian box girder	75
Gambar 4.17. Pembesian box girder	78
Gambar 4.18. Posisi tendon di tumpuan	79
Gambar 4.19. Lintasan inti tendon	81
Gambar 4.20. Tata letak tendon pada bentang 0-40 m	87
Gambar 4.21. Tata letak tendon pada bentang 40 - 80 m.	89
Gambar 4.22. Tegangan pada balok	99
Gambar 4.23. Gaya pada pilar	108
Gambar 4.24. Dimensi pilar	109
Gambar 4.25. General Information PCA Column	110
Gambar 4.26. Material properties PCA Column	111
Gambar 4.27. Ukuran dimensi pilar	111
Gambar 4.28. Jenis tulangan yang di pakai	111
Gambar 4.29. Kebutuhan tulangan	112
Gambar 4.30. Input gaya pada pier	112
Gambar 4.31. Diagram interaksi	113
Gambar 4.32. Penampang pondasi	113
Gambar 4.33. Grafik API metode 2, 1986.	115
Gambar 4.34. Desain pile cap	120
Gambar 4.35. Beban pada pondasi	122

DAFTAR NOTASI

a	= Tinggi blok tegangan persegi ekuivalen (mm)
b_m	= Lebar median (m)
b_t	= Lebar trotoar (m)
t_a	= Tebal lapisan overlay (m)
h_a	= Tebal lapisan balas (m)
t_h	= Tebal genangan air hujan (m)
E_c	= Modulus elastic (MPa)
f_c'	= Kuat tekan beton (MPa)
f_{ci}'	= Kuat tekan beton keadaan awal (saat transfer)
K	= Mutu beton
U	= Angka Poisson
G	= Modulus geser (MPa)
f_{ci1}	= Tegangan ijin tekan (MPa)
f_{ti1}	= Tegangan ijin tarik (MPa)
α	= Koefisien muai Panjang untuk beton (°C)
f_{py}	= Tegangan leleh strand (MPa)
f_{pv}	= Kuat tarik strand (MPa)
d_{ta}	= Diameter nominal strand (mm)
A_{ps}	= Luas tampang nominal satu strand (mm ²)
P_{bs}	= Beban putus nominal satu strand (kN)
P_{b1}	= Beban putus satu tendon (kN)
E_{sps}	= Modulus elastis strand (MPa)
f_y	= Tegangan leleh baja (MPa)
w_c	= Berat beton bertulang (kN/m ³)
w_c'	= Berat beton tidak bertulang (beton rabat) (kN/m ³)
w_w	= Berat jenis air (kN/m ³)
w_s	= Berat jenis baja (kN/m ³)
I_o	= Momen Inersia (m ⁴)
y_b	= Letak titik berat (m ²)
I_x	= Momen inersia terhadap titik berat 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)
W_{balok}	= Berat balok prategang + 10% (kN)
W_d	= Berat satu balok diafragma (kN)
$V_{TB(Lapangan)}$	= Gaya geser maksimum akibat beban T lapangan (kN)
$V_{TB(Tumpuan)}$	= Gaya geser maksimum akibat beban T tumpuan (kN)
$M_{TB(Lapangan)}$	= Momen maksimum akibat beban D lapangan (kN.m)
$M_{TB(Tumpuan)}$	= Momen maksimum akibat beban D tumpuan (kN.m)
y	= Lengan thd. Titik berat balok (m)
M	= Beban momen akibat gaya rem (kN.m)
T_{EW}	= Beban angin tambahan yang meniup bidang samping kendaraan (kN/m^2)
Q_{EW}	= Beban akibat transfer beban angin ke lantai jembatan (kN/m)
δ	= Temperatur Movement (m)
F_{ET}	= Gaya akibat temperatur movement (kN)
e_p	= Eksentrisitas (m)
K_h	= Koefisien beban gempa horisontal
T	= Waktu getar struktur dihitung dengan rumus
W_t	= Berat total yang berupa berat sendiri dan beban mati tambahan
K_p	= Kekakuan struktur yang merupakan gaya horisontal yang diperlukan untuk menimbulkan satu satuan lendutan.
F	= Faktor perangkaan
S	= Sendi plastis beton beton bertulang
K_v	= Koefisien beban gempa vertikal
T_{EQ}	= Gaya gempa vertical (kN)
Q_{EQ}	= Beban gempa vertical (kN/m)
e_s	= Eksentrisitas tendon (m)
P_t	= Gaya prategang awal (kN)
P_j	= Gaya prategang saat jacking
n_t	= Jumlah tendon yang diperlukan (tendon)

n_s	= Jumlah kawat untai (strands cable) yang diperlukan (Strand)
P_o	= Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (% <i>jacking force</i>)
d_s	= Jarak tendon terhadap sisi luar beton (m)
n_b	= Jumlah baris tulangan
Y	= Persamaan lintasan tendon
α_{AB}	= Sudut lintasan tendon dari ujung ke tengah (rad)
β	= Koefisien wobble
P_x	= <i>Loss of prestress</i> akibat gesekan kabel (kN)
e_s	= Jarak titik berat tendon baja terhadap tdk berat tampang balok (m)
I_x	= Momen inersia tampang balok beton (m ⁴)
A_c	= Luas tampang balok beton (m ²)
$E_{c\text{balok}}$	= Modulus elatis balok beton (MPa)
E_{sps}	= Modulus elastis baja prategang (strand) (MPa)
A_{st}	= Luas tampang tendon baja prategang (m ²)
P_{bs}	= Beban putus satu strands (kN)
M_{balok}	= Momen akibat berat sendiri balok (kN.m)
A_t	= Luas tampang tendon baja prategang (m ²)
i	= Jari-jari inersia penampang balok beton (mm)
σ_{pi}	= Tegangan baja prategang sebelum <i>loss of prestress</i> (di tengah bentang) (kPa)
$\Delta\sigma_{pe}'$	= Kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik dengan memperhitungkan pengaruh berat sendiri (kPa)
σ_{bt}	= Tegangan beton pada level bajanya oleh pengaruh gaya prategang P_t (kPa)
ΔP_e	= <i>Loss of prestress</i> akibat pemendekan elastis (kN)
ΔL	= Panjang tarik masuk (berkisar antara 2 - 7 mm) diambil 2 mm (m)
L_x	= Jarak dari ujung sampai tengah bentang balok (m)
m	= Kemiringan diagram gaya (kN/m)
L_{max}	= Jarak pengaruh kritis slip ankur dr ujung (m)
ΔP	= <i>Loss of prestress</i> akibat ankur (kN)
Δs_u	= Pengaruh susut (<i>Shrinkage</i>)
ε_b	= regangan dasar susut (<i>basic shrinkage strain</i>). Untuk kondisi

kering udara dengan kelembaban < 50 %,

k_b	= koefisien yang tergantung pada pemakaian air semen (<i>water cement ratio</i>) untuk beton mutu tinggi dengan factor
k_e	= koefisien yang tergantung pada tebal teoritis (e_m)
σ_{sh}	= Modulus elastis baja prategang (strand), Tegangan susut (MPa)
f_a	= Tegangan beton di serat atas, (kPa)
f_b	= Tegangan beton di serat bawah, (kPa)
ϵ_{cr}	= Regangan akibat creep, (kPa)
σ_r	= Relaxasi setelah 1000 jam pada 70% beban putus (UTS) (kPa)
ΔP	= <i>Loss of Prestress</i> jangka panjang (kN)
S_{xa}	= Momen statis luasan bagian atas
S_{xb}	= Momen statis luasan bagian bawah
P_{bta}	= <i>Bursting force</i> untuk sengkang arah vertikal
P_{btb}	= <i>Bursting force</i> untuk sengkang arah horisontal
A_{ra}	= Luas tulangan sengkang arah vertikal yang diperlukan
A_{rb}	= Luas tulangan sengkang arah horisontal yang diperlukan
U	= Mutu baja sengkang
D	= Diameter sengkang
γ	= Sudut bidang geser
a_s	= Jarak sengkang yang diperlukan
f_b	= Tegangan beton di serat bawah
Q_{TD}	= Lendutan akibat berat sendiri (kN/m)
Q_{MA}	= Lendutan akibat beban mati tambahan (kN/m)
P_{eff}	= Lendutan akibat prestress (kN)

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 : Berita Acara Seminar Proposal Tugas Akhir
- Lampiran 2 : Berita Acara Seminar Hasil Tugas Akhir
- Lampiran 3 : Lembar Koreksi Tugas Akhir
- Lampiran 4 : Daftar Hadir Dosen Penguji Seminar Hasil Tugas Akhir
- Lampiran 5 : Daftar Hadir Seminar Hasil Tugas Akhir
- Lampiran 6 : Lembar Bimbingan Tugas Akhir
- Lampiran 7 : Turnitin
- Lampiran 8 : Gambar Kerja



PERENCANAAN BOX GIRDER PRATEGANG UNTUK JEMBATAN KERETA API

Abstrak

Pembangunan infrastruktur baru berupa jalan tol dan jembatan menjadi prioritas Pemerintah Indonesia. Direktorat Pembangunan Jembatan memiliki target pembangunan jembatan baru sepanjang 38,3 km untuk periode 2020-2024. Hal ini bertujuan untuk menciptakan interkoneksi antara kawasan industri, pariwisata dan lain-lain secara merata di seluruh Indonesia. Pembangunan jembatan kereta api Makassar menjadi salah satu proyek yang dikerjakan.

Pembangunan jembatan kereta api Makassar merupakan jembatan yang menggunakan metode *balanced cantilever* dengan struktur beton *box girder* prategang. Tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk menghitung pembebanan pada struktur jembatan kereta api, merencanakan dimensi dan detail struktur *box girder* serta merencanakan dimensi struktur bawah berupa *pile cap* dan pondasi tiang pancang. Metode pada penelitian ini terdiri dari pengumpulan data, studi literatur, *preliminary design*, perhitungan pembebanan, perhitungan dan analisis struktur, kontrol keamanan, hingga kesimpulan dan penggambaran struktur.

Berdasarkan hasil perhitungan, perencanaan jembatan kereta api menggunakan penampang *box girder* dengan bentang 40 meter yang terdiri dari 10 segmen. Total tendon yang digunakan berjumlah 18 tendon dimana tiap tendon terdiri dari 30 strands. Dimensi *pile cap* yang direncanakan adalah 6,60 m x 6,60 m, terdiri dari 16 buah tiang pondasi berdiameter 0,60 m.

Kata kunci: *balanced cantilever; box girder; jembatan kereta api; prategang*

DESIGN OF A PRESTRESSED BOX GIRDER FOR A RAILWAY BRIDGE

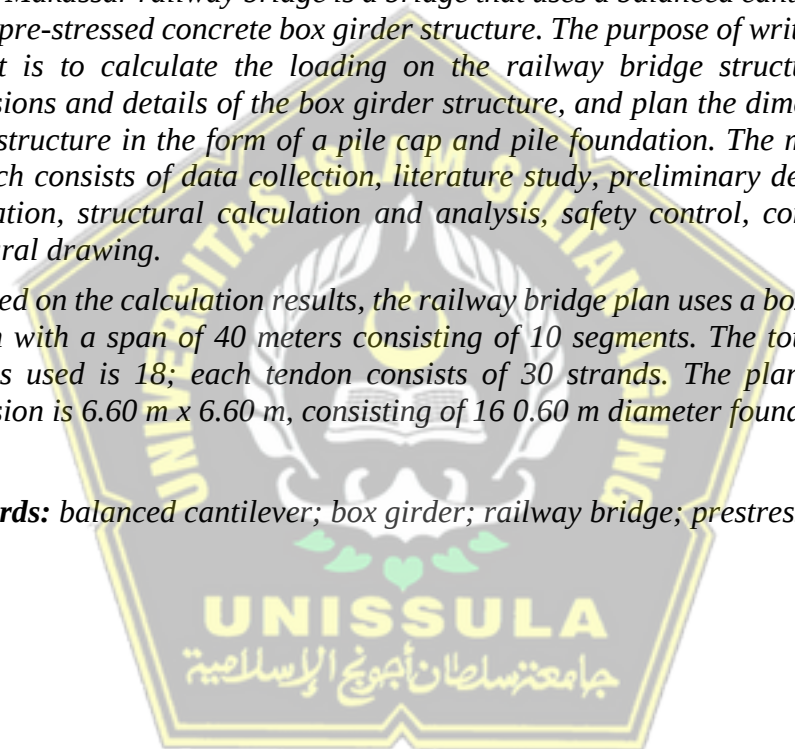
Abstract

New infrastructure development in the form of toll roads and bridges is a priority for the Government of Indonesia. The Directorate of Bridge Construction has a target of building 38.3 km of new bridges for the period 2020–2024. This aims to create interconnections between industrial areas, tourism, and others evenly throughout Indonesia. The construction of the Makassar railway bridge is one of the projects undertaken.

The Makassar railway bridge is a bridge that uses a balanced cantilever method with a pre-stressed concrete box girder structure. The purpose of writing this Final Project is to calculate the loading on the railway bridge structure, plan the dimensions and details of the box girder structure, and plan the dimensions of the lower structure in the form of a pile cap and pile foundation. The method in this research consists of data collection, literature study, preliminary design, loading calculation, structural calculation and analysis, safety control, conclusion, and structural drawing.

Based on the calculation results, the railway bridge plan uses a box girder cross section with a span of 40 meters consisting of 10 segments. The total number of tendons used is 18; each tendon consists of 30 strands. The planned pile cap dimension is 6.60 m x 6.60 m, consisting of 16 0.60 m diameter foundation piles.

Keywords: *balanced cantilever; box girder; railway bridge; prestressing*



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Hingga tahun 2024, pembangunan infrastruktur baru menjadi prioritas Pemerintah Indonesia. Salah satu tujuan utamanya adalah pembangunan jalan tol dan jembatan. Hal ini bertujuan untuk menciptakan interkoneksi antara kawasan industri, pariwisata, perkebunan dan lain-lain secara merata di seluruh Indonesia. Direktorat Pembangunan Jembatan memiliki target pembangunan jembatan baru sepanjang 38,3 km untuk periode 2020-2024. Kondisi ini memberikan kesempatan pada ilmu teknik sipil untuk memperluas wawasannya, terutama di bidang jembatan.

Jembatan merupakan salah satu bangunan konstruksi yang menjadi penghubung ketika terdapat halangan seperti sungai, lembah, laut, jalur, kereta api, danau, jalan raya, dan lain-lain. Jembatan kereta api merupakan jembatan yang digunakan oleh kereta api saja yang terdiri dari rel, gardar, bantalan rel, penambat dan lain-lain.

Pada dasarnya, struktur untuk jembatan kereta api memiliki berbagai pilihan yang bisa digunakan, mulai dari jembatan baja hingga beton. Salah satu jembatan kereta api yang digunakan di Indonesia adalah struktur beton *box girder* prategang. Tujuan dari pemberian gaya prategang untuk menimbulkan lendutan dan tegangan awal yang saling berkebalikan dengan beban yang terjadi akibat beban yang dipikul, sehingga struktur dapat memikul beban yang berat tanpa perlu mengubah kualitas atau mutunya.

Dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini, direncanakan sebuah jembatan kereta api dengan struktur *box girder* yang terdiri dari 3 bagian bentang yaitu bentang 40 meter, 80 meter dan 40 meter. Proses perencanaan menggunakan bantuan program komputer untuk analisis hasil seperti gaya momen, gaya lintang, dan lain-lain serta perhitungan manual untuk menentukan pembebanan pada jembatan sesuai peraturan yang sudah ditetapkan. Perencanaan jembatan disesuaikan dengan pedoman pada beberapa peraturan dan standar yang berlaku.

1.2. Rumusan Masalah

Seperti yang dapat dilihat dari informasi latar belakang diatas, tantangan utama dari penulisan Tugas Akhir ini adalah mengetahui langkah dalam merancang jembatan kereta api *box girder*. Adapun permasalahan penunjang yang lain diuraikan sebagai berikut:

1. Bagaimana menghitung pembebanan yang bekerja pada struktur jembatan kereta api?
2. Bagaimana merencanakan dimensi-dimensi struktur atas dan struktur bawah yang meliputi *box girder*, *pile cap* dan pondasi tiang pancang?

1.3. Maksud dan Tujuan

Tujuan yang akan dicapai dari penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui hasil perencanaan jembatan kereta api *box girder*. Adapun tujuan penunjang yang lain diuraikan sebagai berikut:

1. Menghitung pembebanan yang bekerja pada struktur jembatan kereta api.
2. Merencanakan dimensi dan detail struktur *box girder*.
3. Merencanakan dimensi struktur bawah berupa *pile cap* dan pondasi tiang pancang.

1.4. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penulisan proposal Tugas Akhir ini antara lain:

1. Aspek lingkungan (geologi dan hidrologi) tidak ditinjau.
2. Biaya konstruksi dan waktu pelaksanaan tidak diperhitungkan.
3. Frekuensi getaran tidak dihitung, hanya desain terhadap kombinasi beban berdasarkan SNI 7833:2012.

1.5. Manfaat Penulisan

Adapun manfaat dari rangkaian penulisan Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui semua prosedur perhitungan serta perencanaan struktur pada jembatan kereta api *box girder* sesuai dengan persyaratan yang berlaku.

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan adalah membagi kerangka bab dan sub-bab yang bertujuan agar lebih mudah dan jelas untuk dipahami. Dalam penulisan laporan Tugas Akhir “Perencanaan *Box Girder* Prategang untuk Jembatan Kereta Api” terbagi dalam lima bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Menjelaskan gambaran umum penulisan Tugas Akhir yang memuat latar belakang, rumusan masalah, maksud dan tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori serta uraian sistematis yang berkorelasi dengan perencanaan jembatan kereta api *box girder* prategang.

BAB III METODOLOGI

Menjelaskan pengumpulan data perencanaan, metode pengolahan data, dan sistematika perencanaan jembatan kereta api.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisi perhitungan pembebanan serta analisis detail perhitungan struktur atas jembatan berupa *box girder* prategang, pilar dan pondasi.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Menjelaskan kesimpulan yang berhasil diperoleh berdasarkan hasil perencanaan jembatan kereta api serta memuat saran dari penulis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tinjauan Umum

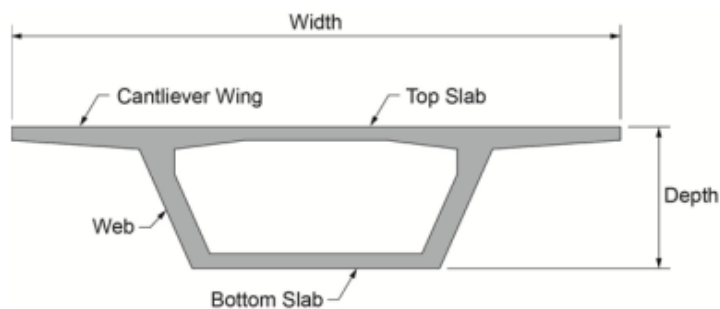
Jembatan adalah suatu konstruksi yang gunanya meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang tidak sebidang dan berada lebih rendah (Struyk, Veen, & Sumargono, 1984). Adapun rintangan yang dimaksud diantaranya sungai, lembah, laut, jalan rel, saluran irigasi maupun rintangan fisik lainnya.

Jembatan terbagi menjadi berbagai variasi tergantung pada fungsi penggunaan, diantaranya jembatan pejalan kaki, jembatan kereta api, dan jembatan jalan raya. Perencanaan sebuah jembatan yang memiliki fungsi untuk perlintasan kendaraan kereta api dengan struktur *box girder*, menjadi fokus pada Tugas Akhir ini.

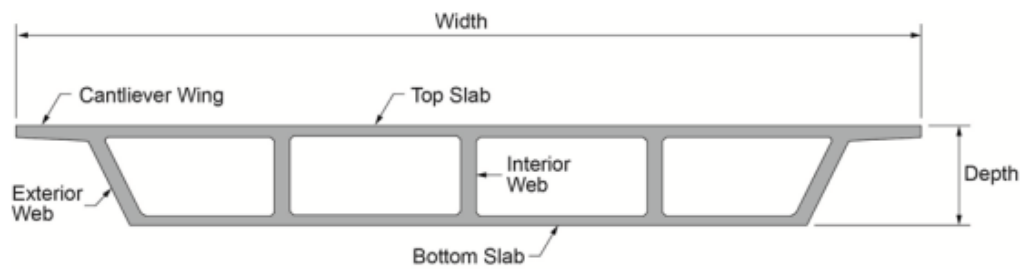
2.2. Jembatan Tipe *Box Girder*

Girder adalah struktur atas jembatan yang mendistribusikan muatan sendiri atau beban lainnya ke bagian bawah struktur. Material penyusun girder bisa dari beton atau baja. Ada beberapa tipe girder jembatan, diantaranya yaitu *I girder*, *Box girder*, *Plate girder*, *T girder* dan *U girder*. *Box girder* menjadi tipe yang akan dibahas pada perencanaan jembatan Tugas Akhir ini.

Jembatan tipe *box girder* yaitu jembatan dengan desain dasarnya ditopang oleh struktur berbentuk kotak kosong, biasanya bentuk penampangnya berupa trapesium atau persegi serta bisa direncanakan berupa *single-cell* atau *multi-cell*. Perencanaan jembatan pada Tugas Akhir ini menggunakan *single-cell*.



Gambar 2.1. *Single-Cell Box Girder Cross Section*
(Sumber: <https://www.midasbridge.com/>)



Gambar 2.2. *Multi-Cell Box Girder Cross Section*
(Sumber: <https://www.midasbridge.com/>)

2.3. Beton Prategang

Beton yang telah diberi tegangan tekan (internal) dengan distribusi atau pembagian sedemikian rupa dalam rangka untuk mengimbangi atau mengurangi tegangan potensial akibat beban yang diterima (eksternal) dikenal dengan beton prategang.

Beberapa keunggulan beton prategang antara lain seluruh penampang digunakan secara efektif sehingga bisa memperkecil dimensi penampang struktur, terhindar dari adanya retakan terbuka didaerah tarik sehingga tahan terhadap korosif dan tahanan geser balok bertambah sebelum terjadi retak maka strukturnya bisa lebih ramping dengan bentang besar.

Terlepas dari keunggulan diatas, struktur beton prategang harus dikerjakan dengan pengawasan ketat dan sangat teliti. Selain itu, biaya satuan pekerjaan struktur beton prategang meningkat karena kebutuhan akan material berkualitas tinggi.

2.3.1. Konsep Prategang

Menurut Lin & Burns, 1988, ada tiga teori berbeda dalam menggambarkan dan menyelidiki karakteristik dasar beton prategang yaitu sebagai berikut:

a. Sistem Prategang untuk mengubah beton menjadi bahan elastis

Didapat melalui pemikiran Eugene Freyssinet yaitu dengan penggambaran atau mentransformasikan beton prategang dari bahan keras menjadi bahan lentur dan memberikan tekanan pada bahan tersebut terlebih dahulu. Pemikiran ini adalah hasil analisis melalui sifat beton itu sendiri. Dimana beton kuat menahan tekanan namun tidak kuat menahan tarikan. Dengan kata lain kuat tekan pada beton tinggi, sedangkan kuat tarik beton rendah.

- b. Sistem memberi tegangan pada beton dan baja mutu tinggi secara bersama-sama. Ide ini mempertimbangkan komposisi beton prategang yaitu perpaduan baja dan beton, dengan kemampuan beton menahan tekanan dan kemampuan baja menahan tarikan sehingga keduanya bekerja sebagai penahan momen yang timbul akibat gaya dari luar (eksternal).
- c. Sistem prategang sebagai penyeimbang beban
- Gagasannya menjelaskan bahwa prategang adalah upaya menyeimbangkan gaya yang bekerja di suatu batang. Tiap komponen pada struktur beton prategang dirancang untuk dapat bekerja sama guna menyeimbangkan berat sendiri. Dari komponen struktur tersebut, maka gelagar, balok dan pelat akan menjadi fleksibel hingga mampu meminimalisir terjadinya tegangan lentur saat menerima beban.

2.3.2. Metode Sistem Prategang

Dalam sistem pelaksanaan prategang tidak bisa terlepas dari proses pengangkuran. Angkur adalah material baja yang dipasang pada beton guna menyalurkan gaya prategang ke beton. Saat proses pengangkuran terjadi perilaku antara beton dengan angkur. Hasil penelitian dari Ramadhan dkk (2023), pola retak pada konstruksi monolit akibat terletak pada daerah sambungan balok, sedangkan pada struktur sambungan angkur terletak pada daerah sekitar angkur. Selain itu pola retak yang terjadi pada kolom berbentuk kerucut, sehingga jenis kegagalan yang terjadi mengindikasikan kegagalan kerucut beton. Perilaku tersebut juga membuktikan guna pentingnya memperhitungkan kehilangan gaya prategang akibat gesekan angkur.

Metode pelaksanaan beton prategang pada dasarnya terdiri dari 2 sistem pelaksanaan, yaitu sistem pra-tarik (*pre-tensioning*) dan pasca-tarik (*post-tensioning*). Deskripsi kedua sistem pelaksanaan beton prategang tersebut adalah sebagai berikut :

a. Pra-tarik (*pre-tensioning*)

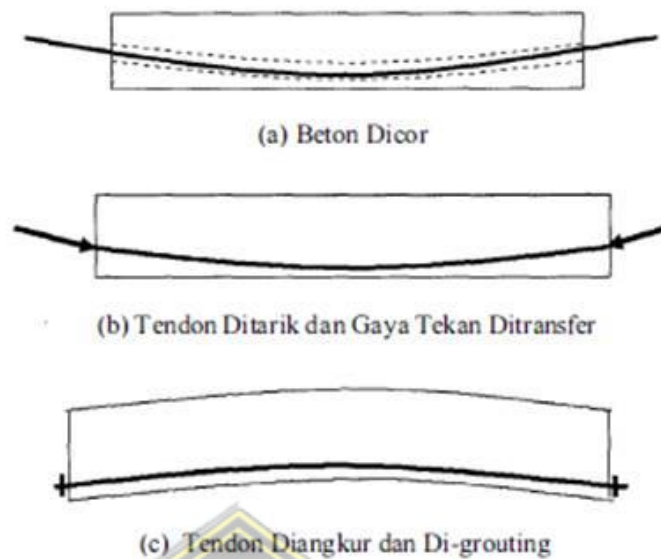
Metode dimana tendon (baja prategang) diberi gaya prategang terlebih dahulu sebelum dilaksanakan pengecoran. Pembuatannya yaitu tendon ditarik, kemudian diikat pada angkur hidup dan angkur mati. Ilustrasi prosedur penggunaan metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.3.

b. Pasca-tarik (*post-tensioning*)

Suatu metode dimana tendon (baja prategang) diberi prategang setelah beton mengeras dengan cara dicor terlebih dahulu. Dengan menjangkar salah satu ujung kabel sambil menarik ujung lainnya, gaya prategang diterapkan. Namun ada juga yang diangkur di kedua sisinya. Setelah diangkur, saluran digrouting pada lubang yang telah disiapkan. Setelah itu, balok beton menjadi tertekan. Karena tendon dipasang melengkung, maka gaya prategang memberikan beban merata pada balok kearah atas. Ilustrasi prosedur penggunaan metode ini dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.3. Metode pelaksanaan pra-tarik
(Sumber: <https://www.ilmutekniksipilindonesia.com/>)



Gambar 2.4. Metode pelaksanaan pasca-tarik
(Sumber: <https://www.ilmutekniksipilindonesia.com/>)

2.3.3. Material Beton Prategang

Konstruksi beton prategang biasanya menggunakan beton mutu tinggi, hal ini guna menahan tegangan tekan pada saat pengangkur tendon (baja prategang) agar tidak terjadi keretakan. Selain itu, penggunaan beton mutu tinggi juga memiliki kegunaan lain, diantaranya karena ekonomis dengan hemat biaya pengangkur, beton mutu tinggi memiliki tarik dan geser yang tinggi dan meminimalisasi keretakan. Berdasarkan SNI 2847-2013 Pasal 8.5, ditetapkan modulus elastisitas beton sebagai berikut :

$$E_c = (w_c)^{1,5} \times 0,043 \sqrt{f_c'} \dots \dots \dots (2.1)$$

keterangan :

- F_c' = tegangan tekan beton (Mpa)
- W_c = berat volume beton (kg/m^3)
- E_c = modulus elastisitas beton (Mpa)

Selain rumus diatas, terdapat cara lain dalam menetapkan modulus elastisitas beton. Berbeda dengan perhitungan modulus elastisitas untuk beton mutu tinggi,

guna mendapatkan nilai modulus elastisitas beton normal ditetapkan dengan rumus sebagai berikut:

$$E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dalam struktur prategang, beton yang digunakan memiliki kualitas lebih tinggi dibandingkan dengan beton bertulang. Hal tersebut disebabkan oleh adanya gaya tekan pada panampang awal yang cukup besar. Sifat pada beton yang terkait dengan beton prategang antara lain:

a. Susut atau *shrinkage*

Karena proses kimia dan penguapan air adukan yang tidak terikat oleh semen, maka semakin meningkatnya umur beton, volume dari adukan akan berkurang.

b. Rangkak atau *creep*

Seiring fungsi dari waktu menyebabkan perubahan bentuk plastis dari adukan beton, maka terjadi perubahan bentuk atau *irreversible* dengan kata lain beton tidak dapat kembali ke bentuk semula.

2.3.4. **Baja Prategang**

Baja yang digunakan pada struktur prategang jauh berbeda mutunya dibandingkan dengan baja tulangan yang biasa digunakan pada struktur bangunan biasa. Baja bermutu tinggi yang biasa digunakan pada struktur prategang memiliki kuat tarik hingga 1200-1800 MPa. Sedangkan baja tulangan yang digunakan pada struktur bangunan biasa memiliki kuat tarik 420 Mpa. Biasanya baja mutu tinggi memiliki kandungan karbon yang lumayan tinggi. Penggunaan baja mutu tinggi bertujuan agar mampu menerima kekuatan tarik dan menghasilkan gaya prategang yang cukup besar.

Dengan menarik tendon yang tertanam dalam beton, gaya prategang tercipta. Setelah penarikan dilakukan sesuai dengan gaya prategang rencana, kemudian tendon ditahan menggunakan angkur sedemikian rupa sehingga kekuatan tariknya terjamin atau gaya prategang yang sudah ditransfer tidak berkurang atau tidak hilang. Pekerjaan penarikan (*jacking*) pada tendon dapat dilakukan dengan dua metode yaitu *pre-tensioning* atau *post-tensioning* dimana sudah dijelaskan lebih detail pada sub-bab 2.3.2. Terdapat tiga macam baja (tendon) yang umum

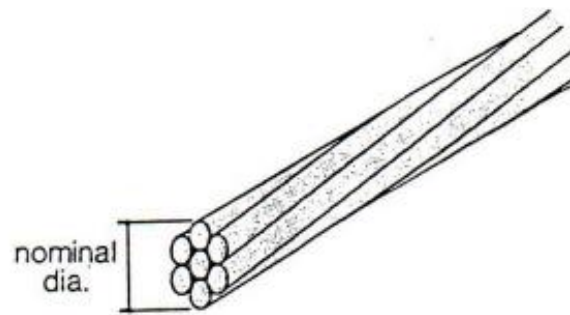
digunakan pada beton prategang antara lain yaitu kawat tunggal (*wires*), kawat untaian (*strand*), dan kawat batangan (*bar*). Detail macam diameter, luas, beban putus dan tegangan tarik dari ketiga macam baja prategang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Tipe baja prategang

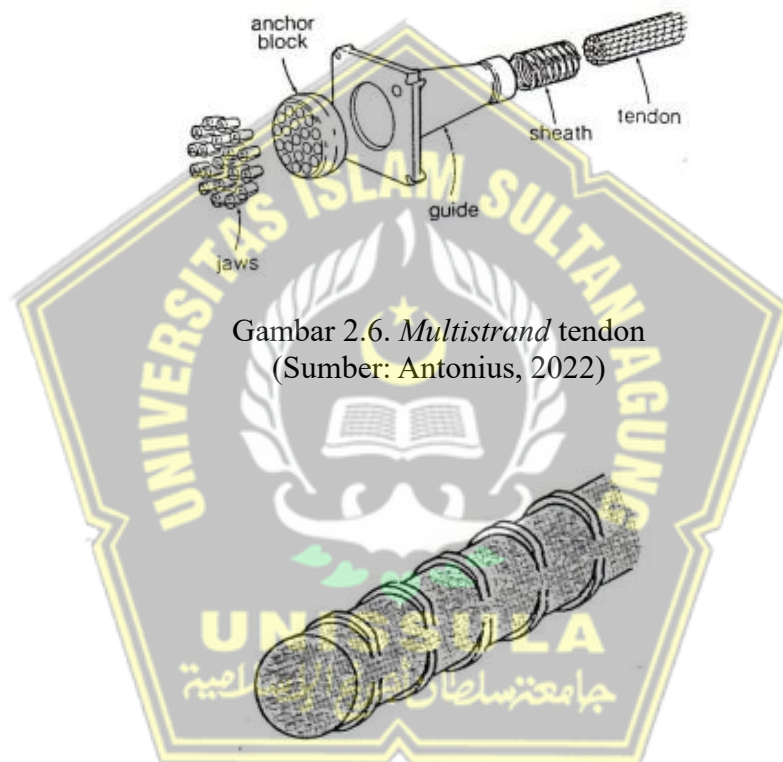
Tipikal Baja Prategang	Diameter	Luas	Beban Putus	Tegangan Tarik
	(mm)	(mm ²)	(kN)	(MPa)
Kawat Tunggal (<i>wire</i>)	3	7,1	13,5	1900
	4	12,6	22,1	1750
	5	19,6	31,4	1600
	7	38,5	57,8	1500
	8	50,3	70,4	1400
Untaian Kawat (<i>strand</i>)	9,3	54,7	102	1860
	12,7	100	184	1840
	15,2	143	250	1750
Kawat Batangan (<i>bar</i>)	23	415	450	1080
	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

(Sumber: Tumpu Miswar, 2020)

Penggunaan jenis atau tipe tendon akan berbeda-beda menurut metode pelaksanaan beton prategang. Tipe *seven-wire strands and single wire* biasa digunakan pada beton prategang yang menggunakan metode pelaksanaan *pre-tension*. Sedangkan tipe tendon *multistrand*, *multiwire*, *monostrand* dan batang tunggal biasa digunakan pada beton prategang yang menggunakan metode pelaksanaan *post-tension*.

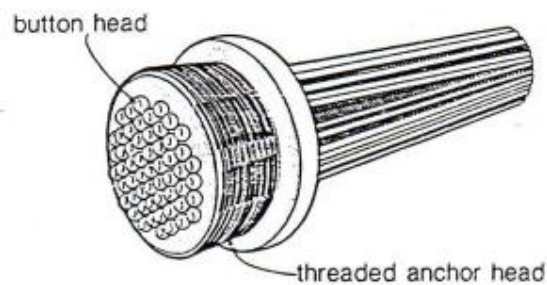


Gambar 2.5. *7-wire monostrand tendon*
(Sumber: Antonius, 2022)



Gambar 2.6. *Multistrand tendon*
(Sumber: Antonius, 2022)

Gambar 2.7. *Single bar tendon*
(Sumber: Antonius, 2022)



Gambar 2.8. *Multi-wire tendon*
(Sumber: Antonius, 2022)

Metode pelaksanaan beton prategang post-tension, memiliki dua tipe sifat penggunaan tendon. Diantaranya adalah tendon yang dapat bersifat *bonded* dan *unbonded*. Tendon yang bersifat *bonded* adalah tendon yang salurannya diisi dengan material grouting. Dimana material grouting yang digunakan yaitu campuran air dan semen dengan rasio w/c 0,5 dan *admixe* (zat pereduksi dan ekspansif air). Pengisian atau pemberian material grouting pada selubung tendon bertujuan untuk meningkatkan kelekatan antara beton dengan baja. Dengan berkurangnya udara dalam selubung tendon akibat adanya material grouting, hal ini juga dapat melindungi baja atau tendon dari korosi yang dapat terjadi dengan seiring berjalannya waktu dan umur waktu tertentu. Sedangkan tendon yang bersifat *unbonded* adalah tendon yang salurannya diisi dengan *grease* (minyak gemuk).



Gambar 2.9. Tendon *bonded*
(Sumber: Antonius, 2022)

Gambar 2.10. Tendon *unbonded*
(Sumber: Antonius, 2022)

Tabel 2.2. *Wire strand (stress relieved)*

Grade	Diameter nominal (mm)	Luas penampang nominal (mm ²)	f _{pu} (MPa)
250	6,35	23,22	1725
	7,94	37,42	
	9,53	51,61	
	11,11	69,68	
	12,54	92,90	
	15,24	139,35	
270	9,53	54,84	1860
	11,11	74,19	
	12,54	98,71	
	14,29	123,87	
	15,24	139,35	

(Sumber: Antonius, 2022)

Tabel 2.3. *Steel wire “Uncoated stress relieved”*

Grade atau tipe	Diameter nominal (mm)	Luas penampang nominal (mm ²)	f _{pu} (MPa)
WA, BA	4,98	18,7	1725
WA	4,98	19,4	1725
BA	4,98	19,4	1655
WA, BA	6,35	31,6	1655
WA	7,01	38,7	1622

(Sumber: Antonius, 2022)

Tabel 2.4. *Steel bar “Smooth alloyed steel bar”*

Grade ASTM	Diameter nominal (mm)	Luas penampang nominal (mm ²)	f _{pu} (MPa)
145	19,05	283,9	1000
	22,22	387,1	
	25,40	503,2	
	28,57	638,7	
	31,75	793,5	
	34,92	954,8	
160	19,05	283,9	1104
	22,22	387,1	
	25,40	503,2	
	28,57	638,7	
	31,75	793,5	
	34,92	954,8	

(Sumber: Antonius, 2022)

2.3.5. Tegangan Ijin Beton

Batas besarnya tegangan yang diterima beton harus diperhitungkan demi menjaga keamanan struktur. Syarat batas tegangan ijin beton prategang saat sebelum mengalami kehilangan gaya prategang diatur pada SNI 7833:2012 Pasal 6.4.1. sebagai berikut :

- a. Kecuali sebagaimana yang diijinkan poin (b), tegangan pada serat tekan terluar tidak boleh melampaui $0,60 f'_{ci}$
- b. Tegangan serat tekan terluar pada ujung komponen yang tertumpu sederhana tidak boleh melampaui $0,70 f'_{ci}$
- c. Tulangan lekatan tambahan harus dipasang ketika kekuatan tarik beton yang dihitung melampaui $0,5 \sqrt{f'_{ci}}$ pada ujung tertumpu sederhana atau $0,25 \sqrt{f'_{ci}}$ di bagian lain. Pemasangan tulangan lekatan tambahan ini sebagai penahan gaya tarik yang terjadi pada beton.

Sedangkan syarat batas tegangan ijin beton prategang setelah mengalami kehilangan prategang yang diijinkan adalah sebagai berikut :

- a. Dengan ditambah beban tetap, tegangan serat tekan akibat gaya prategang tidak boleh melampaui $0,45 f'_{ci}$.
- b. Dengan ditambah beban total, tegangan serat tekan akibat gaya prategang tidak boleh melampaui $0,60 f'_{ci}$.

2.3.6. Tegangan Ijin Tendon

Batas besarnya tegangan yang diterima tendon harus diperhitungkan demi menjaga keamanan struktur dan kekuatan tendon dalam menerima tegangan. Berdasarkan SNI 7833:2012 Pasal 6.5.1 tegangan tarik pada baja prategang tidak boleh melebihi nilai berikut :

- a. Akibat gaya pengangkutan baja prategang..... $0,94 f_{py}$ tetapi tidak lebih besar dari nilai terkecil dari $0,80 f_{pu}$ dan nilai maksimum yang direkomendasikan oleh pabrik pembuat baja prategang atau perangkat angkut.
- b. Segera setelah penyaluran gaya prategang..... $0,82 f_{py}$ tetapi tidak lebih besar dari $0,74 f_{pu}$.
- c. Tendon pasca-tarik, pada perangkat angkut dan kopel (couplers), segera setelah penyaluran gaya..... $0,70 f_{pu}$.

2.3.7. Perhitungan Gaya Prategang

Untuk tegangan pada serat atas :

$$\begin{aligned} 0,25\sqrt{f_{c'i}} &= -P_t / A_c + P_t \times e_s / W_a - M_{\text{balok}} / W_a \dots \dots \dots (2.3) \\ P_t &= (0.25\sqrt{f_{c'i}} + M_{\text{balok}} / W_a) / (e_s / W_a - 1/A_c) \end{aligned}$$

Untuk tegangan pada serat bawah :

$$\begin{aligned} 0,55 f_{c'i} &= -P_t / A_c - P_t \times e_s / W_b + M_{\text{balok}} / W_b \dots \dots \dots (2.4) \\ P_t &= (0.55 f_{c'i} + M_{\text{balok}} / W_b) / (e_s / W_b - 1/A_c) \end{aligned}$$

keterangan :

- P_t = gaya prategang awal (kN)
- $f_{c'i}$ = kuat tekan beton (kPa)
- M_{balok} = momen akibat berat sendiri balok (kNm)
- W_a = tahanan momen sisi atas (m^3)
- W_b = tahanan momen sisi bawah (m^3)
- e_s = eksentrisitas tendon (m)
- A_c = luas penampang balok prategang (m^2)

2.3.8. Tahap Pembebanan Beton Prategang

Pembebanan prategang memiliki keistimewaan yaitu banyaknya pembebanan yang harus diperhatikan. Tahap pembebanan meliputi tahap akhir, tahap awal, dan tahap antara. Dalam sub bab ini hanya di bahas tahap akhir pada kondisi beban batas pada pembenahan tetap serta tahap awal pemberian gaya prategang.

a. Saat transfer gaya prategang

Ketika sebuah struktur diberi gaya prategang dan struktur belum terbebani oleh gaya atau beban eksternal, gaya prategang tendon harus disesuaikan dengan tegangan ijin agar tidak terjadi putus pada sebagian atau seluruh tendon. Pada saat pengakuran penarikan tendon banyak terjadi kehancuran beton itu terjadi dikarenakan beton memiliki mutu yang kecil atau rendah, maka diperlukan kontrol tegangan yang terjadi pada beton.

b. Saat beban batas (*Ultimate Load*)

Ultimate load suatu struktur dapat diartikan beban maksimum yang mampu ditahan suatu struktur sebelum mengalami kehancuran. Teangan yang diperhitungkan pada suatu struktur bisa jadi tidak memungkinkan dalam menahan beban yang berlebihan karena struktur mempunyai batas minimum ketika memikul beban yang lebih besar. Jadi hendaklah diberikan kekuatan batas (*Ultimate Load*).

c. Saat beban bekerja tetap (*Sustained Load*)

Ketika beban tetap bekerja, maka akan terjadi lendutan ke atas dan ke bawah yang sudah direncanakan. Sehingga perlu membatasi besaran lendutan yang terjadi akibat beban tetap.

2.3.9. Eksentrisitas

Eksentrisitas diberikan atau bekerja searah longitudinal suatu struktur. Gaya eksentrisitas ini berguna untuk mencegah pertumbuhan atau terjadinya retak. Hal ini dapat terjadi ketika gaya eksentrisitas mampu mengeliminasi tegangan tarik yang didistribusikan ke titik *support* (tumpuan) pada kondisi kritis saat beban bekerja. Hal ini mampu meningkatkan kelenturan dan kapasitas geser.

2.3.10. Tata Letak Tendon

Pengaturan tata letak tendon bertujuan agar tendon agar berada di posisi yang aman. Perhitungan tata letak tendon bermaksud agar memiliki peninjauan letak tendon pada tiap jarak tertentu untuk suatu bentang balok yang direncanakan. Terdapat beberapa tipe hubungan antara balok dan tendon, antara lain :

- a. Balok lurus dengan tendon melengkung yang mengikuti sisi tarik dari balok. Tata latak ini sering di gunakan untuk balok dengan bentang pendek yang lebih mengutamakan bekisting sederhana dari pada penghematan baja dan beton. Keberatan utama disini adalah kehilangan tegangan akibat gesekan dan sulitnya pemasangan pemasukan tendon di lubang, terutama bila balok di buat menerus di atas bentang.
- b. Untuk bentang yang lebih besar dan beban berat. Mungkin lebih ekonomis apabila diberikan lengkungan atau pertebalan. Ini memungkinkan untuk

menghemat beton dan baja namun juga memungkinkan penggunaan tendon yang lurus, serta ditempatkan pada sisi tarik pada balok. Akan tetapi akan sulit mendapatkan eksentrisitas optimum apabila tendon dipasang lurus.

- c. Tata letak tendon yang terbaik sering di dapat dari titik temu dari kedua cara di atas, yaitu menggunakan menggunakan balok yang melengkung serta sedikit melengkungkan tendon. Ini akan memberikan tebal balok maksimum dan posisi baja akan ideal di semua titik, tanpa menghilangnya prategang yang berlebihan akibat gesekan.
- d. Kabel-kabel yang bersilangan pada titik peralihan. Memberikan kemungkinan gaya prategang di sepanjang bentang balok. Kabel dan batang lebih berat dapat di pasang dan dapat di tegangkan dengan kehilangan prategang karena gesekan sedikit. Cara ini diperlukan angker ujung yang lebih banyak dalam di dapatkannya pasca tarik untuk balok yang memiliki bentang cukup banyak.

2.3.11. Kehilangan Gaya Prategang

Proses transfer atau pemberian gaya prategang akan menghadirkan berbagai perilaku yang terjadi antara beton dan baja prategang. Perilaku-perilaku antara beton dan baja prategang inilah yang akan mengakibatkan kehilangan gaya prategang. Hilangnya atau berkurangnya gaya prategang pada tendon diakibatkan oleh beberapa faktor.

Kehilangan tegangan terbagi atas dua bagian besar, tergantung dari waktu terjadinya. Keduanya adalah kehilangan jangka pendek (*immediate losses of prestress*) dan kehilangan jangka panjang (*long term losses of prestress*). Kehilangan tegangan jangka pendek terjadi pada saat transfer atau setelah proses penarikan tendon. Penyebab kehilangan tegangan jangka pendek antara lain akibat dari gesekan angkur, akibat dari gesekan kabel, serta akibat dari pemendekan elastis. Sedangkan kehilangan tegangan jangka panjang terjadi pada saat *service* atau perlahan seiring pengaruh waktu (jangka waktu tertentu). Penyebab kehilangan tegangan jangka panjang antara lain akibat dari pengaruh rangkai dan pengaruh susut. Sumber-sumber kehilangan prategang antara lain yaitu :

a. Gesekan angkur

Besarnya kehilangan tegangan akibat dari gesekan angkur adalah 3% dari hasil perhitungan gaya prategang saat penarikan (*jacking*) dengan rumus sebagai berikut :

$$P_o = 97\% \times P_j \dots \dots \dots (2.5)$$

P_o = gaya prategang setelah kehilangan tegangan akibat gesekan angkur (kN)

P_j = gaya prategang akibat *jacking* (kN)

b. Gesekan kabel (*jack friction*)

Kehilangan tegangan efek dari gesekan kabel terjadi karena terjadinya gesekan disepanjang kabel saat proses pemberian gaya prategang, sehingga mengakibatkan pengurangan tegangan. *Loss of prestress* akibat *jack friction* dipengaruhi oleh perubahan besaran sudut lintasan tendon, panjang kabel yang diukur, koefisien gesek dan koefisien wobble. Besarnya koefisien gesek dan koefisien wobble diperoleh dari Tabel yang berpedoman pada NAASRA *Bridge Design Spesification* sebagai berikut :

Tabel 2.5. Koefisien gesek, μ

VALUES OF COEFFICIENT μ (SIMULTANEOUS STRESSING)	
Type of duct or tendon support	Typical values for μ
Bright or zine-coated metal duct	0,20
Lead-coated metal duct	0,15
Unlined preformed holes in concrete	0,50
External tendons over machined cast steel saddles fixed to concrete	0,15
Bars, without ducts, greased and wrapped with tape prior to concreting	0,20

(Sumber : NAASRA *Bridge Design Spesification*, 1976)

Tabel 2.6. Koefisien wobble, β

VALUES OF COEFFICIENT β	
Type of duct or tendon support	Typical values for β
Ducts containing tendons other than bars :	
(a) 50 mm and less internal diameter	0,016
(b) over 50 mm and up to 90 mm diameter	0,012
(c) over 90 mm internal diameter	0,008
Ducts of any diameter containing bars	0,008
Unlined holes in concrete formed by steel tubing or bars	0,008
Bars without ducts, greased and wrapped with tape prior to concreting	0,008

(Sumber : NAASRA *Bridge Design Spesification*, 1976)

Rumus perhitungan untuk mencari besarnya kehilangan tegangan akibat gesekan kabel adalah sebagai berikut :

$$P_x = P_o \times e^{-\mu(\alpha + \beta L_x)} \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana :

- P_x = *loss of prestress* akibat gesekan kabel (kN)
- P_o = gaya prategang akibat jacking setelah memperhitungkan *loss of prestress* akibat gesekan angkur (kN)
- e = 2.7183 (bilangan natural)
- μ = koefisien gesek
- α = perubahan sudut total lintasan tendon (rad)
- β = koefisien wobble
- L_x = bentang jembatan yang diinginkan (m)

c. Perpendekan elastis

Ketika gaya prategang bekerja pada struktur, hal tersebut menyebabkan beton mengalami pemendekan. Posisi tendon yang melekat pada beton juga secara bersamaan atau serentak mengalami pemendekan. Oleh karena itu, tendon akan mengalami kehilangan gaya prategang.

$$K_e = A_t / A_c \times (1 + e_s^2 / i^2) \dots \dots \dots (2.7)$$

Dengan pengaruh berat sendiri, kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik,

$$\Delta \sigma_{pe}' = \sigma_{pi} \times n \times K_e / (1 + n \times K_e) \dots \dots \dots (2.8)$$

Kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik tanpa pengaruh berat sendiri,

$$\Delta \sigma_{pe} = \frac{1}{2} \times n \times \sigma_{bt} \dots \dots \dots (2.9)$$

Kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis,

$$\Delta P_e = \Delta \sigma_{pe} \times A_t \dots \dots \dots (2.10)$$

dimana :

- K_e = nilai pembagian luas tampang tendon dengan luas tampang beton
- A_t = luas tampang tendon baja prategang (m^2)
- A_c = luas tampang balok beton (m^2)
- i = jari-jari inersia penampang balok beton (mm)
- $\Delta \sigma_{pe}'$ = kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik dengan pengaruh berat sendiri (kPa)
- σ_{pi} = tegangan baja prategang sebelum loss of prestress di tengah bentang (kPa)
- $\Delta \sigma_{pe}$ = kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik tanpa pengaruh berat sendiri (kPa)
- σ_{bt} = tegangan beton pada level bajanya oleh pengaruh gaya prategang (kPa)
- ΔP_e = kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis (kN)

d. Pengangkuran

Kehilangan tegangan akibat pengangkuran terjadi akibat slip atau posisi angkur yang tidak tepat ketika transfer tegangan. Perhitungan kehilangan tegangan akibat pengangkuran dapat diperoleh dari beberapa persamaan sebagai berikut :

$$L_{\max} = \sqrt{(\Delta L \times E_{\text{sps}} \times A_t / m)} \dots \dots \dots (2.11)$$

$$\Delta P = 2 \times L_{\max} \times \tan \omega \dots \dots \dots (2.12)$$

$$P'_{\max} = P_o - \Delta P / 2 \dots \dots \dots (2.13)$$

$$P_{\max} = P'_{\max} - \Delta P \dots \dots \dots (2.14)$$

e. Susut beton

Beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya susut beton yaitu antara lain tipe agregat, waktu perawatan, kondisi lingkungan, tipe semen, ukuran komponen struktur dan lain-lain. Perhitungan *loss of prestress* akibat susut beton dapat diperoleh melalui persamaan sebagai berikut :

$$\Delta_{\text{su}} = \epsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p \dots \dots \dots (2.15)$$

keterangan :

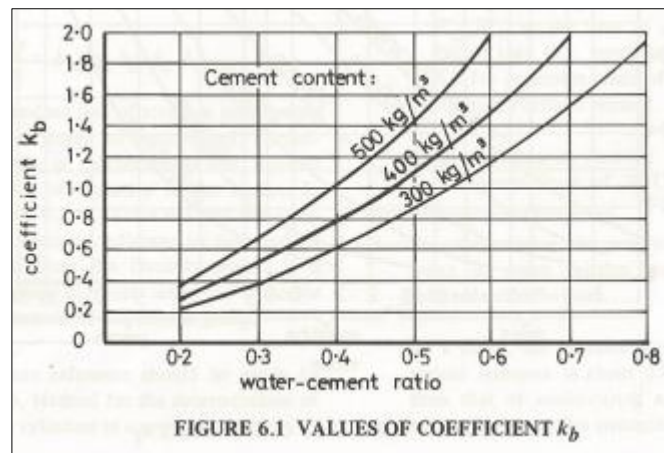
ϵ_b = regangan dasar susut.

Tabel 2.7. Regangan dasar susut ϵ_b

VALUES OF COEFFICIENT ϵ_b		
Climatic condition	Average relative humidity as a percentage	Basic shrinkage strain ϵ_b
Dry air	<50	600×10^{-6}
Generally in the open air, and not subject to periods of prolonged high temperature or low humidity	50 to 75	400×10^{-6}
In very humid air, e.g. over water	>75	200×10^{-6}
In water	100	0

(Sumber : NAASRA *Bridge Design Spesification*, 1976)

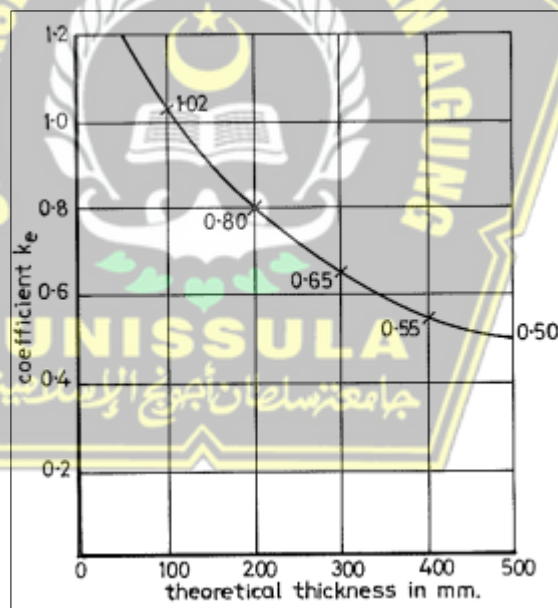
k_b = koefisien yang tergantung pada pemakaian air semen



Gambar 2.11. Koefisien k_b

(Sumber : NAASRA *Bridge Design Spesification*, 1976)

k_e = koefisien yang tergantung pada tebal teoritis (e_m)



Gambar 2.12. Koefisien k_e

(Sumber : NAASRA *Bridge Design Spesification*, 1976)

k_p = koefisien yang tergantung pada luas tulangan baja memanjang non prategang

f. Rangkak beton

Beban yang secara terus menerus bekerja pada suatu penampang, maka akan meningkatkan regangan yang kemudian disebut rangkak. Regangan elastis adalah perubahan diawal waktu akibat dari pengaruh beban. Sedangkan regangan rangkak adalah regangan tambahan yang diakibatkan oleh beban-beban yang bekerja secara menerus. Perhitungan regangan rangkak dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut :

$$\epsilon_{cr} = (f_c / E_{c \text{ balok}}) \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_{tn} \dots \dots \dots (2.16)$$

keterangan :

- ϵ_{cr} = koefisien tergantung pada kelembaban udara.
- k_c = koefisien yang tergantung pada derajat pengerasan beton saat dibebani.
- k_{tn} = koefisien yang tergantung pada waktu dimana pengerasan terjadi dan tebal teoritis.

2.4. Pembebanan pada Jembatan Kereta Api

Proses perencanaan jembatan kereta api tidak akan terlepas dari tahapan perhitungan pembebanan yang bekerja pada struktur jembatan. Perhitungan pembebanan yang bekerja pada struktur jembatan kereta api berpedoman pada Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012. Adapun beberapa beban yang perlu diperhitungkan antara lain, beban mati, beban mati tambahan, beban hidup, gaya rem, pengaruh temperatur, beban gempa dan beban angin pada kendaraan.

2.4.1. Beban Mati

Perhitungan pembebanan yang berasal dari berat sendiri disebut dengan beban mati. Seluruh bagian struktur jembatan termasuk unsur-unsur tambahan seperti trotoar pagar tepi tergabung dalam beban mati. Selain beban trotoar dan pagar tepi, berat sendiri balok prategang juga menjadi bagian beban mati. Dalam konteks Tugas Akhir ini menggunakan struktur box girder prategang. Untuk nilai rho (ρ) bahan beton yang digunakan untuk perhitungan beban mati yaitu 24.00 kN/m³.

Pada struktur jembatan kereta api, jembatan terbebani dengan beberapa jenis beban mati tambahan antara lain rel, bantalan dan lapisan balas. Lebar rel yang

digunakan di Indonesia ada dua jenis, yaitu lebar jalan rel 1067 mm dan 1435 mm. Masing-masing lebar jalan rel memiliki klasifikasi kelas jalan yang memperhatikan kecepatan maksimal, beban gandar maksimal, tipe rel yang digunakan, jenis dan jarak antar bantalan, jenis penambat dan tebal lapisan balas. Detail klasifikasi kelas jalan dijabarkan pada Tabel berikut.

Tabel 2.8. Kelas jalan untuk lebar jalan rel 1067 mm

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	V maks (km/jam)	P maks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
					Jarak antar sumbu bantalan (cm)			
I	$> 20.10^6$	120	18	R.60/R.54	Beton 60	Elastis Ganda	30	60
II	$10.10^6 - 20.10^6$	110	18	R.54/R.50	Beton/Kayu 60	Elastis Ganda	30	50
III	$5.10^6 - 10.10^6$	100	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 60	Elastis Ganda	30	40
IV	$2.5.10^6 - 5.10^6$	90	18	R.54/R.50/R.42	Beton/Kayu/Baja 60	Elastis Ganda/Tunggal	25	40
V	$< 2.5.10^6$	80	18	R.42	Kayu/Baja 60	Elastis Tunggal	25	35

(Sumber: Peraturan Menteri Nomor 60, 2012)

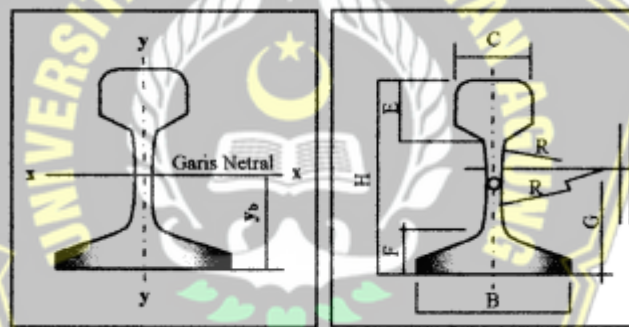
Tabel 2.9. Kelas jalan untuk lebar jalan rel 1435 mm

Kelas Jalan	Daya Angkut Lintas (ton/tahun)	V maks (km/jam)	P maks gandar (ton)	Tipe Rel	Jenis Bantalan	Jenis Penambat	Tebal Balas Atas (cm)	Lebar Bahu Balas (cm)
					Jarak antar sumbu bantalan (cm)			
I	$> 20.10^6$	160	22,5	R.60	Beton 60	Elastis Ganda	30	60
II	$10.10^6 - 20.10^6$	140	22,5	R.60	Beton 60	Elastis Ganda	30	50
III	$5.10^6 - 10.10^6$	120	22,5	R.60/R.54	Beton 60	Elastis Ganda	30	40
IV	$< 5.10^6$	100	22,5	R.60/R.54	Beton 60	Elastis Ganda	30	40

(Sumber: Peraturan Menteri Nomor 60, 2012)

Komponen penting dari struktur jalan kereta api salah satunya adalah rel. Rel terbangun atas kumpulan dari logam batangan yang memanjang seiring rencana lajur kereta api yang akan dibangun. Kepastian keamanan dari rel agar tidak

mengalami perubahan posisi adalah dengan cara memberikan pengikat atau penambat antara rel dengan dudukan rel atau yang biasa disebut bantalan. Tiap negara di dunia memiliki lebar jalan rel yang berbeda-beda. Dalam implementasi rel ke lapangan, demi kenyamanan suatu lalu lintas kereta api, rel yang dibawa dari pabrik kemudian disambung di lapangan. Proses penyambungan rel ini menggunakan beberapa cara diantaranya dengan praktik las dan penyambungan dengan baut. Terdapat empat tipe rel yang sering digunakan, yaitu tipe R42, tipe R50, tipe R54 dan tipe R60. Secara sederhana, dapat dikatakan tipe rel R60 berarti tipe rel tersebut memiliki berat sendiri 60 kg/m. Untuk tipe R54 berarti tipe rel tersebut memiliki berat sendiri 54 kg/m. Untuk tipe R50 berarti tipe rel tersebut memiliki berat sendiri 50 kg/m. Untuk tipe R42 berarti tipe rel tersebut memiliki berat sendiri 42 kg/m. Berlaku juga konsep sederhana tersebut pada tipe rel lain. Berikut adalah ilustrasi dari pendimensian penampang rel.



Gambar 2.13. Penampang rel
(Sumber: Peraturan Menteri Nomor 60, 2012)

Tabel 2.10. Dimensi penampang rel

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R 42	R 50	R 54	R 60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
A = luas penampang				
W = berat rel permeter				
I _x = momen inersia terhadap sumbu x				
Y _b = jarak tepi bawah rel ke garis netral				

(Sumber: Peraturan Menteri Nomor 60, 2012)

Selain rel, beban tambahan pada struktur jembatan kereta api adalah bantalan. Bantalan memiliki fungsi guna meneruskan beban dari kereta api dan jalan rel ke lapisan dibawahnya yaitu lapisan balas. Selain itu, bantalan juga memiliki fungsi sebagai bagian yang memancangkan lebar jalan rel. Rel diberi penambat dengan mengaitkannya pada bantalan. Material pembentuk bantalan biasanya dari kayu, baja, dan beton. Bantalan dengan material beton biasanya menggunakan beton prategang. Hal ini memiliki banyak keuntungan dimana antara lain bantalan beton prategang mampu menahan beban kereta api yang lebih besar dan tahan lebih lama terhadap kondisi cuaca. Selain itu, bantalan rel dapat berupa slab yang biasa diaplikasikan pada kereta-kereta yang berada pada *flyover*. Masing-masing tipe bantalan diatur sedemikian besaran dimensinya sesuai dengan lebar jalan rel yang direncanakan. Dalam perencanaan jembatan kereta api kali ini menggunakan jenis bantalan beton dimana memiliki aturan dimensi sebagai berikut:

Tabel 2.11. Dimensi bantalan beton

Untuk lebar jalan rel 1067 mm			
Panjang	=	2000 mm	
Lebar maksimum	=	260 mm	
Tinggi maksimum	=	220 mm	
Untuk lebar jalan rel 1435 mm			
Panjang	=	2440 mm	(untuk beban gandar sampai dengan 22,5 ton)
		2740 mm	(untuk beban gandar diatas 22,5 ton)
Lebar maksimum	=	330 mm	
Tinggi dibawah dudukan rel	=	220 mm	

(Sumber: Peraturan Menteri Nomor 60, 2012)

Lapisan balas adalah lapisan dibawah bantalan rel dengan material pembentuknya sangat terpilih karena menerima tegangan besar akibat dari beban lalu lintas kereta dari rel. Fungsi dari lapisan balas antara lain untuk menyebarkan dan meneruskan beban ke tanah dibawahnya, meloloskan air agar tidak terjadi genangan serta mempekokoh kedudukan bantalan rel. Tinggi lapisan balas disesuaikan dengan lebar jalan rel dan kelas jalan. Material pembentuk lapisan balas berupa kerikil dengan berat 19 kN/m.

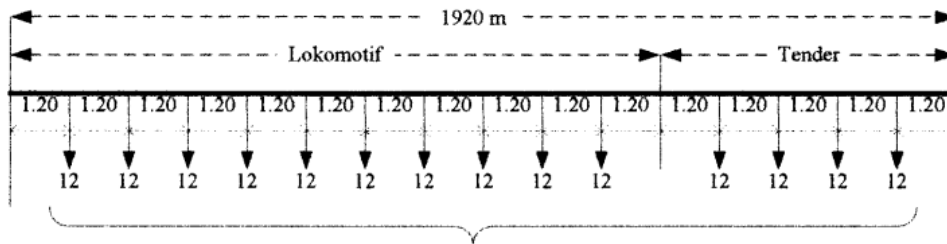
2.4.2. *Beban Hidup*

Perhitungan beban hidup disini adalah proses memperhitungkan beban bergerak yang bekerja pada struktur jembatan. Pada umumnya, beban yang bekerja pada struktur jembatan didominasi oleh beban lalu lintas kendaraan. Dalam kasus Tugas Akhir ini, beban lalu lintas kendaraan yang bekerja adalah kendaraan kereta api. Beban hidup yang diperhitungkan diambil dari beban gandar terbesar mengacu pada skema rencana muatan untuk kereta api. Pedoman yang digunakan untuk pembebanan hidup adalah rencana muatan 1921.

RENCANA MUATAN 1921

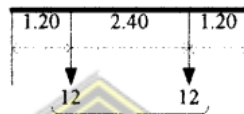
MUATAN GERAK

Sebagai muatan gerak dianggap suatu susunan kereta api terdiri dari 2 Lokomotif pakai tender, serupa demikian:



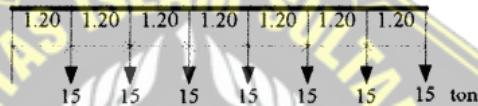
Jumlah Berat 168 ton atau 8,75 ton/m

Bila dengan kereta / gerobak yang banyaknya tidak tertentu, serupa demikian:

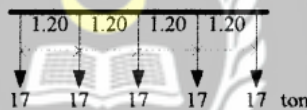


Jumlah 24 ton atau 5 ton/m

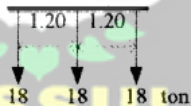
Susunan kereta itu selalu dibikin sehingga bagi bagian yang harus dihitung kekuatannya paling berbahaya. Jika ada 6 atau 7 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 15 ton.



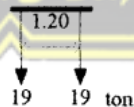
Jika hanya ada 5 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 17 ton.



Jika hanya ada 3 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 18 ton.



Jika hanya ada 2 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 19 ton.



Jika hanya ada 1 gandar yang dapat tempat dalam hitungannya, maka beratnya muatan gandar harus ditambah sampai 20 ton.



Dari rencana-rencana muatan tersebut, selalu yang dipilih itu rencana yang pendapatannya paling berbahaya bagi yang dihitungnya.

2.4.3. Gaya Rem

Gaya rem adalah beban yang bekerja longitudinal memanjang ke arah rel. Pengaruh dari gaya-gaya dalam yang bekerja akibat pengereman harus ditinjau. Beban pengereman menurut PM No.60 tahun 2012 adalah 25% dari beban kereta. Dari pedoman lain, besaran gaya rem dapat ditentukan tergantung dari panjang jembatan yang direncanakan.

$$\begin{aligned} \text{Gaya rem, } H_{TB} &= 250 && \text{untuk } L_t \leq 80 \text{ m} \\ \text{Gaya rem, } H_{TB} &= 250 + 2.5 (L_t - 80) && \text{untuk } 80 < L_t < 180 \text{ m} \\ \text{Gaya rem, } H_{TB} &= 500 && \text{untuk } L_t \geq 180 \text{ m} \end{aligned}$$

2.4.4. Beban Angin

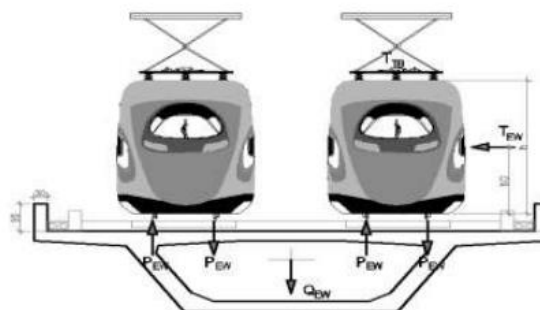
Beban yang beraksi secara horizontal, tegak lurus terhadap rel akibat adanya tekanan angin. Gaya angin yang bekerja meniup kendaraan pada lantai jembatan diperhitungkan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$T_{EW} = 0.0012 \times C_w \times (V_w)^2 \dots \dots \dots (2.17)$$

$$Q_{EW} = 2 \times [(\frac{1}{2} \times h) / x \times T_{EW}] \dots \dots \dots (2.18)$$

dimana :

- T_{EW} = beban angin tambahan yang meniup bidang samping kendaraan (kN/m²)
- Q_{EW} = beban akibat transfer beban angin ke lantai jembatan (kN/m)
- V_w = kecepatan angin rencana (m/det)
- h = bidang vertikal samping kendaraan di atas lantai jembatan
- x = jarak antara roda kendaraan



Gambar 2.14. Beban angin pada kereta api

2.4.5. Pengaruh Temperatur

Gaya dalam yang dipengaruhi oleh perbedaan temperatur dapat diperhitungkan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$P_t = A_t \times E_{c_{balok}} \times \alpha \times (T_a + T_b) / 2 \dots \dots \dots (2.19)$$

dimana :

A_t = luas penampang yang ditinjau (m^2)

T_a = perbedaan temperatur gradien bagian atas $(^{\circ}C)$

T_b = perbedaan temperatur gradien bagian bawah $(^{\circ}C)$

Perbedaan temperatur, $\Delta T = 15^{\circ}C$

Modulus elastisitas balok, $E_{c_{balok}} = 3.57 \times 10^7 \text{ kPa}$

Koefisien muai, $\alpha = 1.00 \times 10^{-5} / ^{\circ}C$

2.4.6. Beban Gempa

Dalam perencanaan suatu konstruksi bangunan yang akan dibangun, perlu diperhitungkan adanya beban akibat gempa. Beban gempa perlu diperhitungkan karena melihat kemungkinan-kemungkinan akan terjadinya beban yang bekerja pada bangunan yang disebabkan oleh pergerakan tanah akibat dari gempa. Dalam perhitungan beban gempa ditinjau dan disesuaikan dengan lokasi proyek. Untuk mendapatkan besaran beban gempa, perlu dicari beberapa koefisien percepatan yang menjadi dasar perhitungan awal. Koefisien percepatan tersebut antara lain nilai PGA, S_s , S_1 . Nilai dari beberapa koefisien tersebut dapat diketahui melalui peta yang tersedia pada SNI 2833:2016. Selain itu, nilai koefisien diatas pula membantu dalam menentukan beberapa koefisien lanjutan seperti kelas situs, F_a , F_v , kategori kinerja seismik seperti S_{D1} , S_{D5} , pembagian zona gempa, hingga faktor modifikasi respon (R). Beberapa tahapan yang harus diikuti dalam perencanaan beban gempa terilustrasikan melalui bagan alir pada Gambar 2.15.

2.4.7. Lendutan

Pembebanan yang bekerja pada balok akan mengakibatkan suatu balok mengalami lendutan. Dengan kata lain lendutan adalah perubahan bentuk yang disebabkan oleh adanya beban yang bekerja pada balok itu sendiri. Besaran *deflection* dapat ditinjau

dari perubahan posisi batang (arah y) sebelum terbebani dengan sudah dikenai beban. Nilai besarnya lendutan dibatasi sesuai dengan kepentingan dan desain suatu bangunan masing-masing. Batas maksimum lendutan yang diijinkan diatur dalam SNI 7833:2012.

Tabel 2.12. Lendutan maksimum yang diijinkan

Jenis komponen struktur	Lendutan terhitung	Batas lendutan
Atap datar yang tidak menahan atau tidak disatukan dengan komponen non-struktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar.	Lendutan seketika akibat beban hidup (L)	$\ell/180^*$
Lantai yang tidak menahan atau tidak disatukan dengan komponen non-struktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar.	Lendutan seketika akibat beban hidup (L)	$\ell/360$
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau disatukan dengan komponen non-struktural yang mungkin akan rusak oleh lendutan yang besar	Bagian dari lendutan total yang terjadi setelah pemasangan komponen non-struktural (jumlah dari lendutan jangka panjang, akibat semua beban tetap yang bekerja, dan lendutan seketika, akibat penambahan beban hidup) ¹	$\ell/480^{\ddagger}$
Konstruksi atap atau lantai yang menahan atau disatukan dengan komponen non-struktural yang mungkin tidak akan rusak oleh lendutan yang besar		$\ell/240^{\S}$

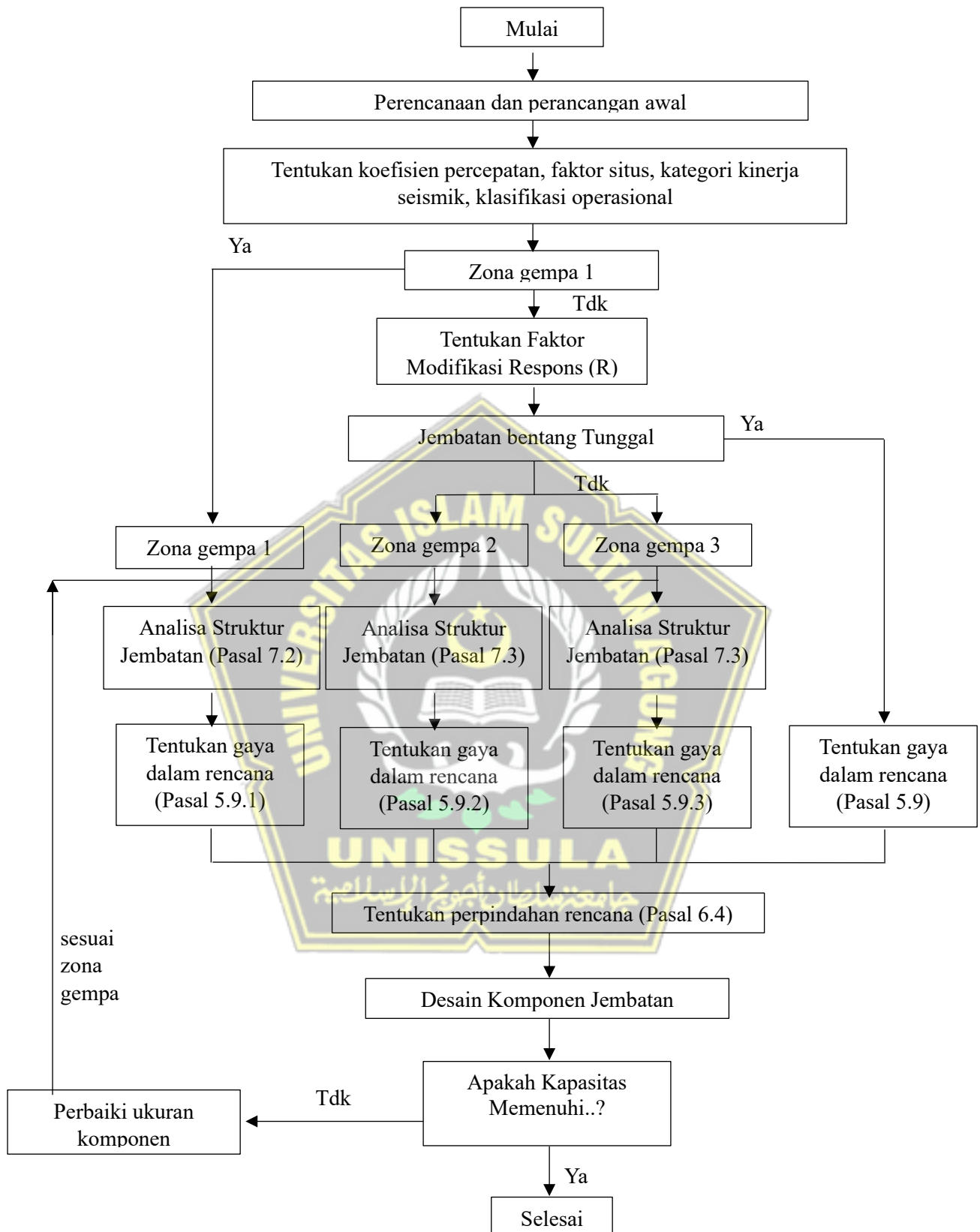
* Batasan ini tidak dimaksudkan untuk mencegah kemungkinan penggenangan air. Kemudian penggenangan air harus diperiksa dengan melakukan perhitungan lendutan, termasuk lendutan tambahan akibat adanya penggenangan air tersebut, dan mempertimbangkan pengaruh jangka panjang dari beban yang selalu bekerja, lawan lendut, toleransi konstruksi dan keandalan sistem drainase.

[†] Lendutan jangka panjang harus dihitung berdasarkan ketentuan 5.2.7.1.4 atau ketentuan 5.2.7.1.5 tetapi boleh dikurangi dengan nilai lendutan yang terjadi sebelum penambahan elemen non-struktural. Besarnya nilai lendutan ini harus ditentukan berdasarkan data teknis yang dapat diterima berkenaan dengan karakteristik hubungan waktu dan lendutan dari komponen struktur yang serupa dengan komponen struktur yang ditinjau.

[‡] Batas lendutan boleh dilampaui bila langkah pencegahan kerusakan terhadap elemen yang ditumpu atau yang disatukan telah dilakukan.

[§] Batas tidak boleh lebih besar dari toleransi yang disediakan untuk komponen non-struktural. Batas ini boleh dilampaui bila ada lawan lendut yang disediakan sedemikian hingga lendutan total dikurangi lawan lendut tidak melebihi batas lendutan yang ada.

(Sumber: SNI 7833:2012)

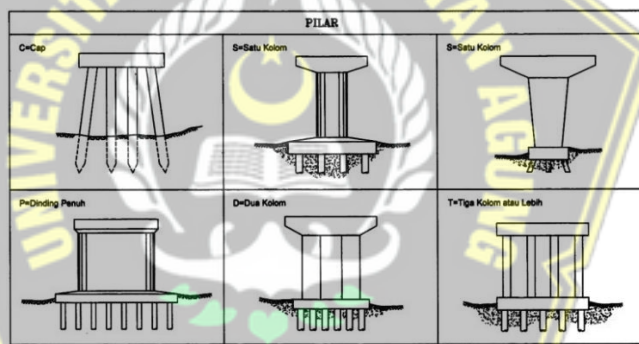


Gambar 2.15. Diagram alir perancangan jembatan terhadap beban gempa.
(Sumber: SNI 2833:2016)

2.5. Pilar Jembatan

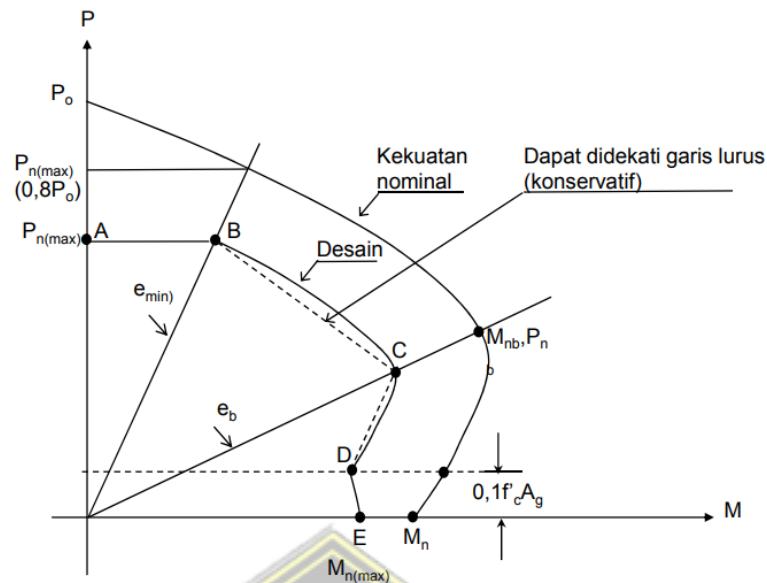
Pilar (*pier*) adalah salah satu bagian struktur jembatan yang memiliki tipe bentuk berbeda-beda guna membagi bentang suatu jembatan agar tidak terlalu panjang. Selain itu, fungsi utama dari pilar adalah untuk menerima dan meneruskan beban dari struktur atas ke pondasi bagian bawah. Perencanaan pilar dilakukan dengan menyesuaikan kondisi lokasi jembatan serta desain yang sesuai dengan bagian struktur jembatan yang lain.

Sebuah konstruksi pilar (*pier*) pada umumnya memiliki 2 bagian, yaitu *pier head* dan badan pilar. *Pier head* memiliki fungsi yang memikul ujung perletakan jembatan yaitu antara gider dan bearing (sebagai dudukan girder). Sedangkan badan pilar memiliki fungsi yang meneruskan gaya dari kepala pilar (*pier head*) ke pondasi. Terdapat beberapa jenis pilar yang telah terangkum pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Jenis pilar (*pier*)
(Sumber: Kementerian PUPR, 2018)

Dalam perencanaan kolom bangunan atau pilar jembatan, dapat dibantu dengan *software* PCA Column. PCA Column adalah program komputer yang dapat membantu dalam proses perencanaan, desain dan pemeriksaan struktur kolom atau pilar. Program ini akan lebih mudah digunakan ketika analisa struktur sudah dilakukan. Setelah dilakukan analisa struktur dan diketahui gaya-gaya yang bekerja pada pilar, maka selanjutnya dapat dilakukan perhitungan desain tulangan kolom. Hasil pemeriksaan kekuatan pilar disajikan dalam bentuk grafik interaksi P-M. Grafik interaksi P-M suatu kolom adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara beban aksial dengan kuat momen pada elemen struktur. Grafik interaksi P-M tergambar pada Gambar dibawah ini.



Gambar 2.17. Hasil diagram interaksi kekuatan P-M pada kolom.
(Sumber: Nawy Edward, 1998)

Kontrol keamanan pilar terhadap beban yang bekerja dapat ditunjukkan melalui hasil diagram interaksi P-M diatas. Dalam input data pada *software* PCA-Column diperlukan beberapa parameter yang bisa membantu perencanaan sebuah pilar. Parameter yang perlu diinput dalam *software* PCA-Column antara lain kuat tekan beton dan konfigurasi tulangan. Berdasarkan hasil penelitian Cholida dkk (2018), tulangan pengekan memiliki peran penting dalam meningkatkan kapasitas aksial kolom.

2.6. Pondasi

Pondasi adalah bagian konstruksi jembatan sebagai penerus beban dari struktur atas dan struktur bawah jembatan ke tanah. Maka dari itu, pondasi bangunan harus direncanakan dan diperhitungkan dengan baik agar terjamin kestabilan jembatan. Pondasi menjadi kontrol keamanan sebuah konstruksi terhadap beban yang bekerja misalnya gempa, angin dan lain sebagainya.

Dalam penentuan jenis pondasi yang digunakan, maka perlu dilakukan analisis terhadap letak tanah keras (dibawah abutment dan pilar). Pada umumnya, konstruksi jembatan dengan bentang panjang menggunakan pondasi bore pile dan

tiang pancang. Perbedaan dari kedua jenis pondasi tersebut terletak pada proses atau metode pelaksanaan konstruksinya.

Pondasi *bore pile* dilakukan dengan cara mengebor tanah terlebih dahulu. Cara pengeboran tanah untuk pondasi *bore pile* digunakan cara pengeboran berulang dengan getaran yang rendah. Pondasi *bore pile* banyak digunakan pada proyek konstruksi misalnya jembatan. Sedangkan pondasi tiang pancang dilaksanakan dengan bantuan



Gambar 2.18. Pondasi bore pile
(Sumber: www.rumah.com)

Tahapan pelaksanaan pada pondasi *bore pile*:

a. Proses pengeboran

Untuk pondasi *bore pile*, proses pengeboran tanah dapat dilakukan dengan dua sistem yang berbeda. Kedua sistem tersebut yaitu sistem bor kering dan bor basah.

b. Pembersihan lubang pengeboran

Pembersihan lubang hasil pengeboran dilakukan dengan alat khusus dengan diameter sesuai lubang. Tujuannya agar lubang bersih dari sisa-sisa tanah bekas pengeboran.

c. Pemasangan besi

Kerangka baja yang telah diinstal dimasukkan secara perlahan kedalam lubang hasil pengeboran. Agar tidak jatuh atau tidak sesuai rencana, diperlukan tulangan melintang dari lubang bor sebagai penahan baja telah masuk kedalam lubang. Apabila baja tulangan yang dibutuhkan melebihi 12 meter, maka dapat disambung dengan kawat beton.

d. Pengecoran

Tahapan terakhir yang dilaksanakan adalah tahap pengecoran. Proses pengecoran dilakukan secara terus menerus agar tidak terjadi macet pada pipa tremi.

Penggunaan pondasi *bore pile* memiliki sejumlah keunggulan, diantaranya kedalaman pondasi dan dimensi pondasi yang bervariasi, pondasi *bore pile* tidak menimbulkan getaran yang besar, sehingga dapat diaplikasikan pada daerah yang padat bangunannya. Namun pondasi *bore pile* pun memiliki sejumlah kekurangan, diantaranya proses pengeboran dan pengecoran untuk pondasi *bore pile* sangat bergantung pada cuaca, ketika lubang hasil pengeboran kemasukan air maka akan mengganggu kondisi tanah sehingga mengurangi kekuatan tanah.

Cukup berbeda dengan tahap pelaksanaan pondasi *bore pile*, pada pondasi tiang pancang tahap pertama yang dilakukan yaitu persiapan dengan memperhatikan lokasi atau titik-titik pondasi yang sudah direncanakan. Proses pengangkatan tiang dari truk harus dilakukan secara hati-hati. Kemudian saat proses pemancangan, tiang pancang dipasang pada drop hammer. Guna memastikan pemancangan dilakukan secara maksimal, perlu dilakukan pemeriksaan terhadap kondisi tiang pancang. Baik itu berupa kelurusan tiang, maupun kondisi fisik dari tiang.

Penggunaan tiang pancang memiliki keuntungan diantaranya yaitu pembuatannya bisa dalam bentuk *precasting* atau dibuat di pabrik terlebih dahulu, sehingga dimensi diameter dan kedalaman tiang dapat diatur sedemikian rupa. Namun, perencanaan pondasi tiang pancang memerlukan perhitungan perencanaan kekuatan tanah dan pondasi yang detail agar tidak menimbulkan kerusakan atau kegagalan struktur pondasi. Selain itu, pelaksanaan pondasi tiang pancang memerlukan beberapa alat berat yang harus digunakan. Sehingga cukup sulit apabila lokasi proyek berada pada kawasan yang padat.

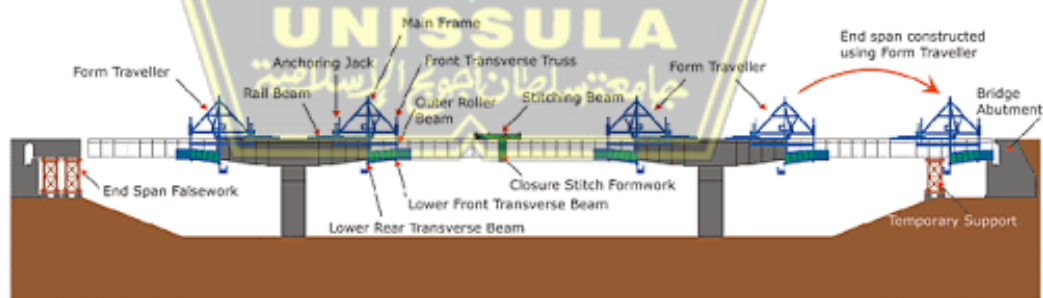
2.7. Metode *balanced cantilever*

Balanced cantilever adalah metode pembangunan jembatan layang yang pekerjaannya dilakukan di atas agar tidak mengganggu aktifitas pengendara yang berada di bawah. Metode *balanced cantilever* memanfaatkan keseimbangan struktur dan kemampuan struktur untuk menahan beban dengan tegangan kabel

prestress. Pembangunan *balanced cantilever* dimulai dari *pier* kemudian dibangun segmental dari kedua sisi dan bertemu ditengah bentang saat bertemu ditengah bentang terdapat cor-cor an yang berbeda dari segmen-segmen yang lainnya yang disebut *closure* (pertemuan dua segmen). Serta dengan bantuan alat berat girder *launcher* dan *form traveller*.

- a. *Form traveller* adalah sebuah alat konstruksi metode *balanced cantilever* yang digunakan untuk membentuk bagian-bagian pada struktur jembatan sesuai kebutuhan dan dilakukan pengecoran di tempat, alat ini juga dapat berfungsi sebagai bekisting berjalan.
- b. *Girder launcher* adalah sebuah alat konstruksi metode *balanced cantilever* yang khusus di gunakan sebagai alat angkat pada konstruksi jembatan pemasangan girder.

Penegangan tendon (*post-tension*) adalah sistem prategang tendon yang dimana kabel ditarik saat beton sudah mengeras. Untuk penegangan tendon dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu di bawah dan di atas, jika memiliki lahan cukup luas untuk pengerjaan dianjurkan melakukan penegangan tendon di bawah tetapi jika minim lahan dapat dilakukan penegangan tendon di atas walaupun cukup beresiko. Penegangan tendon (*post-tension*) bertujuan untuk membentuk struktur permanent yang menjadi tumpuan untuk segmen selanjutnya.



Gambar 2.19. Tahap pelaksanaan jembatan metode *balanced cantilever*.
(Sumber: Eko Prasetyo, 2010)

BAB III

METODOLOGI

3.1. Tinjauan Umum

Pembahasan metodologi adalah bagaimana cara guna mendapatkan data yang akan digunakan dan diperlukan untuk penelitian. Langkah pertama penyusunan laporan ini yaitu dengan mencari studi pustaka yang memiliki keterkaitan dengan penelitian. Sumber literasi atau studi pustaka dan tinjauan teori diambil dari buku kuliah, peraturan pemerintah dan standar nasional yang memiliki keterkaitan dengan penyusunan laporan Tugas Akhir.

Setelah itu melakukan metode pengumpulan data. Beberapa data yang dicari adalah data-data yang dapat diaplikasikan sebagai penunjang selama proses perencanaan. Selanjutnya data dipilah, kekurangan pada data dapat dilengkapi terlebih dahulu. Ketika semua data telah lengkap, dapat dilakukan analisis data sehingga didapatkan keakuratan data yang akan digunakan. Setelah itu, dapat melakukan perencanaan dan desain untuk penyusunan laporan Tugas Akhir.

Penelitian pada Tugas Akhir ini adalah bersifat perencanaan. Objek studi yang direncanakan berupa jembatan kereta api yang menggunakan *box girder* dengan mengubah spesifikasi, perhitungan, dan pembebanan sesuai dengan Standar Nasional Indonesia.

3.2. Tahapan Perencanaan

Tahapan perencanaan yang perlu dilakukan antara lain :

3.2.1. Pengumpulan Data

Langkah awal sebelum perencanaan adalah pengumpulan data-data yang diperlukan. Data yang dikumpulkan akan menjadi penunjang dalam proses perencanaan jembatan. Adapun data yang dikumpulkan antara lain data proyek, data struktur utama (pondasi, girder, plat lantai, dan tulangan), data gambar perencanaan dan data tanah. Secara lebih detail, data yang dikumpulkan adalah sebagai berikut:

Nama Proyek	: Perencanaan pembangunan Jembatan Kereta Api Makassar.
Fungsi Bangunan	: sebagai penghubung jalan transportasi kereta api.
Lokasi	: Kota Makassar, Provinsi Sulawesi Selatan.
Struktur Jembatan	: Konstruksi beton pracetak menggunakan <i>box girder</i> .
Pajang jembatan	: terdiri dari 3 bentang yaitu panjang 40 meter, 80 meter dan 40 meter.
Lebar Jembatan	: 7,60 meter.

3.2.2. Studi Literatur

Beberapa literatur yang dipelajari untuk penyusunan laporan bersumber dari Peraturan Dinas, Peraturan Menteri Perhubungan, Standar Nasional Indonesia dan buku-buku yang berhubungan dengan proses perencanaan jembatan. Beberapa standar yang digunakan antara lain :

- Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api.
- Peraturan Dinas N0.10 tentang Perencanaan Konstruksi Jalan Rel.
- SNI 2833 : 2016 tentang Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa.
- SNI 1725 : 2016 tentang Pembebanan untuk Jembatan.
- SNI 7833 : 2012 tentang Tata cara perancangan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung.

3.2.3. Preliminary Design

Desain awal yaitu tahap merencanakan ukuran atau dimensi pada masing-masing bagian jembatan yang hendak digunakan sebelum dilakukan perhitungan.

3.2.4. Perhitungan Pembebanan

Dasar beban untuk Jembatan Kereta Api ini berdasarkan pedoman, SNI 2833:2016, SNI 1725:2016 dan P.M Nomor 60 tahun 2012. Beberapa beban untuk jembatan kereta api antara lain :

- a. Beban sendiri
- b. Beban mati tambahan
- c. Beban lajur
- d. Gaya rem
- e. Beban angin
- f. Pengaruh temperatur
- g. Beban gempa

3.2.5. Perhitungan dan Analisis Struktur

Perhitungan struktur ini dianalisis dengan bantuan program komputer. Analisis ini bertujuan untuk menemukan gaya-gaya yang bekerja pada kontrol tegangan.

3.2.6. Penggambaran Struktur

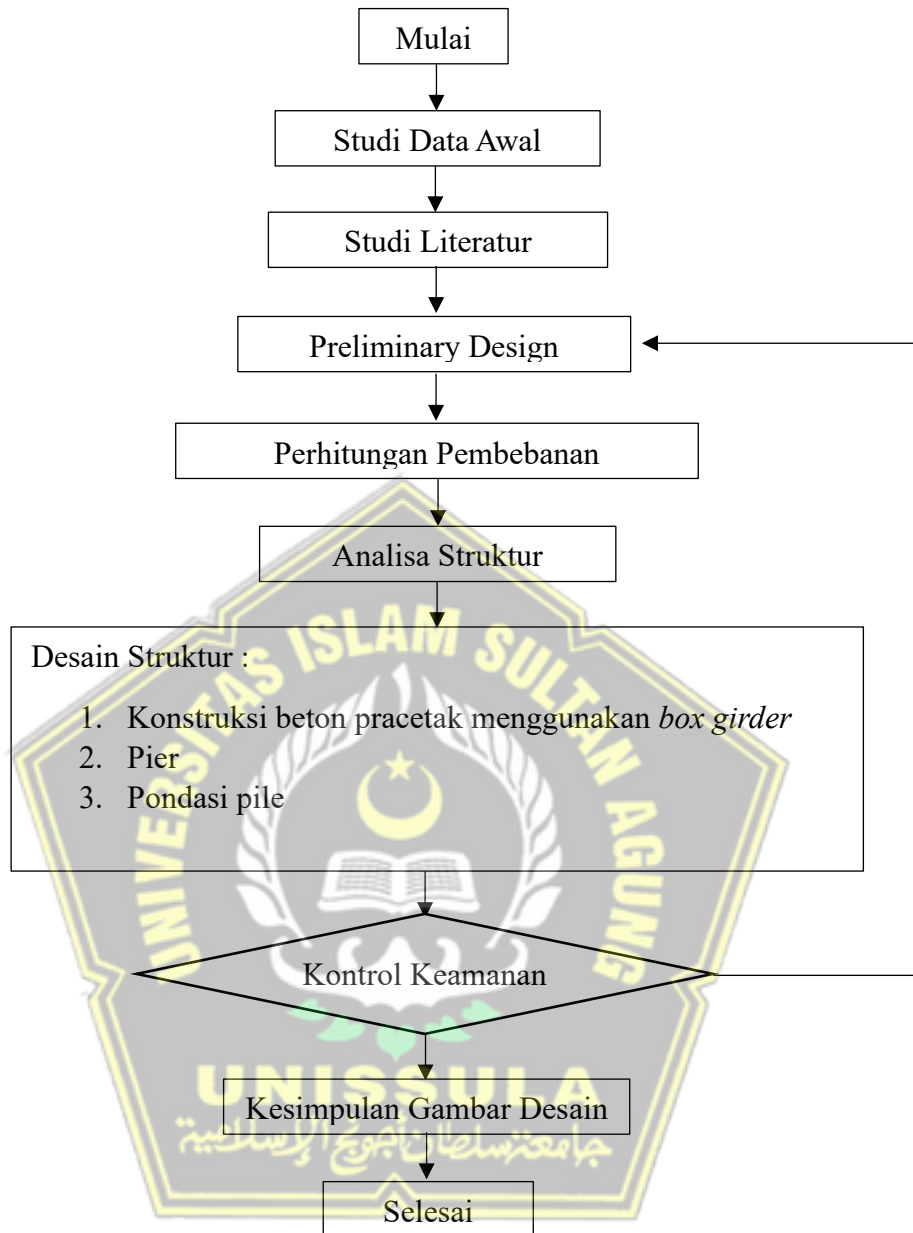
Dalam pembuatan seluruh gambar struktur jembatan menggunakan program komputer.

3.3. Pemodelan Desain Struktur

Untuk permodelan jembatan kereta api *box girder* menggunakan 2 dimensi. Alasan permodelan hanya menggunakan 2 dimensi dikarenakan hanya untuk mencari nilai-nilai gaya seperti momen, lintang dan lainnya. Setelah mendapat gaya tersebut dilanjutkan dengan melakukan perhitungan manual.

3.4. Diagram Alir

Proses perencanaan struktur jembatan kereta api *box girder* dalam rangka menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini ditampilkan melalui diagram alir pada Gambar 3.1. sebagai berikut.



Gambar 3.1. Diagram alir perencanaan jembatan kereta api *box girder*.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

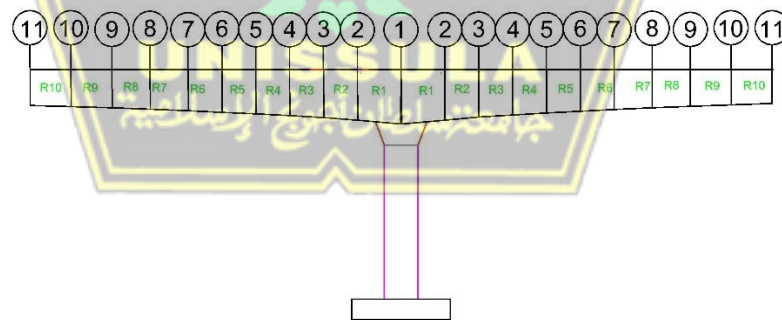
4.1. Tinggi Tafsiran *Box Girder*

Tahap awal untuk merencanakan dimensi *box girder* dengan metode *balanced cantilever* adalah menentukan tinggi tafsiran penampang. Untuk menentukan tinggi tafsiran penampang (H_{tafsiran}) *box girder* diambil dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} H_{\text{tafsiran}} \text{ untuk tumpuan} &= 1/24 \times L \\ &= 1/24 \times 80,00 \\ &= 3,33 \text{ meter} \approx 3,80 \text{ meter} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_{\text{tafsiran}} \text{ untuk tengah bentang} &= 1/47 \times L \\ &= 1/47 \times 80,00 \\ &= 1,70 \text{ meter} \approx 3 \text{ meter} \end{aligned}$$

Dari nilai tinggi diatas, dengan menggunakan perbandingan kesebangunan akan diperoleh tinggi *box girder* untuk setiap segmennya yaitu :



Gambar 4.1. Model jembatan untuk tiap segmen

Tabel 4.1. Tinggi tiap segmen sesuai Gambar 4.1.

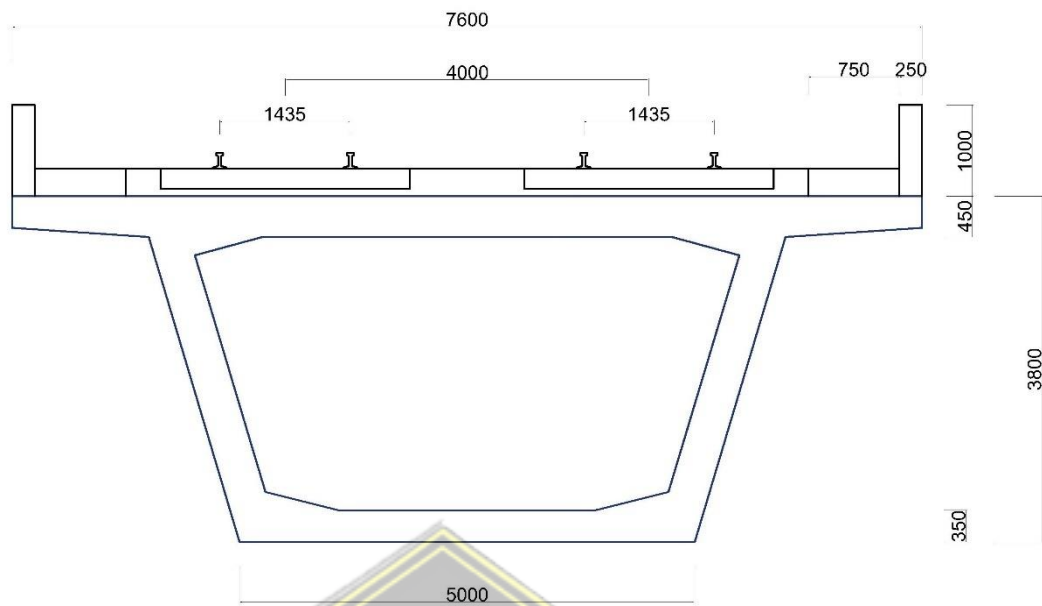
Joint	H_{tafsiran} (m)	Jarak (m)
1	3,8000	3,8000
2	3,7200	3,8000
3	3,6400	3,8000
4	3,5600	3,8000
5	3,4800	3,8000
6	3,4000	3,8000
7	3,3200	3,8000
8	3,2400	3,8000
9	3,1600	3,8000
10	3,0800	3,8000
11	3,0000	3,8000

Pehitungan pada sub-bab selanjutnya adalah contoh perhitungan dimensi *box girder* untuk $H_{\text{tafsiran}} = 3,8000$ m dan untuk bentang selanjutnya proporsional sesuai dengan tingginya.

4.2. Data Struktur Atas

Panjang <i>box girder prestress</i>	$L = 80,0000$ m
Lebar jalur lalu lintas	$B = 7,6000$ m
Tinggi <i>box girder</i>	$H = 3,8000$ bh
Lebar trotoar	$b_t = 1,0000$ m
Tebal lapisan balas	$t_a = 0,3000$ m
Tebal genangan air hujan	$t_h = 0,1000$ m
Jumlah lajur	$L_{\text{track}} = 2,0000$

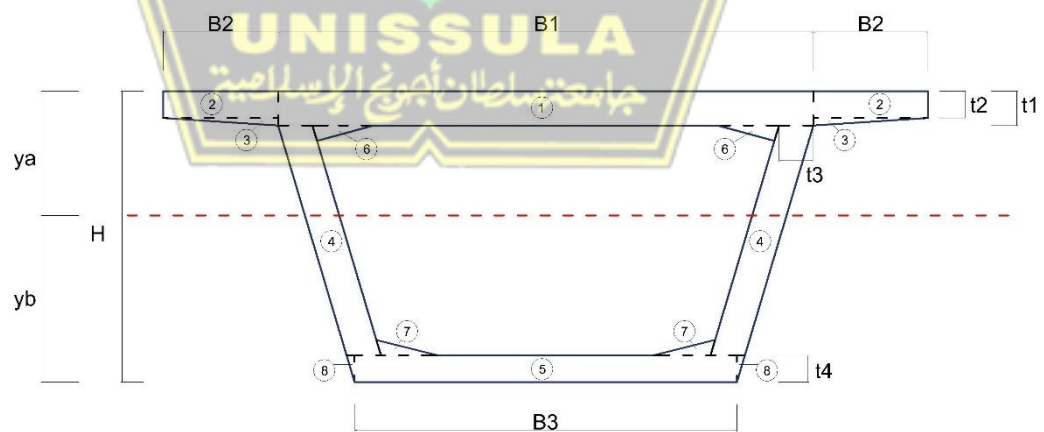
Penampang *box girder* disuguhkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Penampang *box girder*

4.3. Properties Penampang Box Girder

Untuk menentukan parameter geometri, penampang *box girder* dibagi menjadi beberapa bagian. Gambar 4.3. menggambarkan rencana pembagian pada penampang *box girder* yang dibagi menjadi 8 bagian, kemudian letak titik berat setiap bagian dihitung untuk menemukan titik berat keseluruhan penampang utuh.

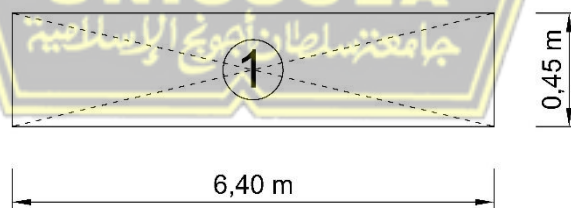


Gambar 4.3. Properties penampang *box girder*

Tabel 4.2. Dimensi pembagian penampang *box girder*.

Slab atas,	$B_1 =$	6,4000 m
	$t_1 =$	0,4500 m
	$B_2 =$	0,6000 m
	$t_2 =$	0,3500 m
Tinggi total,	$H =$	3,8000 m
Dinding bagian tepi,	$t_3 =$	0,4500 m
Slab bawah,	$B_3 =$	5,0000 m
	$t_4 =$	0,3500 m
	$x =$	0,8000 m
	$y =$	0,2000 m
Lebar total <i>box girder</i> ,	$B_{tot} = B_1 + 2 B_2 =$	7,6000 m
Tinggi dinding,	$h = H - t_1 - t_4 =$	3,0000 m
	$a = (B_1 - B_3) / 2 =$	0,7000 m
	$c = h + t_4 =$	2,6500 m

Berdasarkan dimensi rencana pada Tabel 4.2., kemudian dapat dihitung untuk menentukan luas penampang hingga momen inersia pada masing-masing bagian. Berikut adalah cara penyelesaian untuk menghitung momen inersia pada bagian (1) :



Gambar 4.4. Penampang bagian 1

$$\text{Lebar (b)} = 6,4000 \text{ m}$$

$$\text{Tinggi (h)} = 0,4500 \text{ m}$$

$$\text{Jumlah penampang (n)} = 1$$

Jarak terhadap alas (y) :

$$\begin{aligned}y &= H - (h/2) \\&= 3,8000 - (0,4500/2) \\&= 3,8000 - (0,2250) \\&= 3,5750 \text{ m}\end{aligned}$$

Luas penampang (A) :

$$\begin{aligned}A &= (b \times h) \times n \\&= (6,4000 \times 0,4500) \times 1 \\&= (2,8800) \times 1 \\&= 2,8800 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Statis momen

$$\begin{aligned}&= A \times y \\&= 2,8800 \times 3,5750 \\&= 10,2960 \text{ m}^3\end{aligned}$$

Inersia momen

$$\begin{aligned}&= A \times y^2 \\&= 2,8800 \times 3,5750^2 \\&= 2,8800 \times 12,7806 \\&= 36,8082 \text{ m}^4\end{aligned}$$

Momen inersia (I_o) = $(1/12 \times b \times h^3) \times n$

$$\begin{aligned}&= (1/12 \times 6,4000 \times 0,4500^3) \times 1 \\&= (1/12 \times 6,4000 \times 0,0911) \times 1 \\&= (0,0486) \times 1 \\&= 0,0486 \text{ m}^4\end{aligned}$$

Dengan cara yang sama, bagian lain disesuaikan menurut dimensi masing-masing. Berikut hasil perhitungan luas tampang, statis momen, dan momen inersia untuk 7 bagian lainnya, dirangkum dalam Tabel 4.3. berikut ini.

Tabel 4.3. Perhitungan momen inersia

No	Dimensi		Jumlah Tampang (n)	Luas Tampang (A)	Jarak terhadap Alas (y)	Statis Momen (A x y)	Inersia Momen (A x y ²)	Inersia Momen (I _o)
	Lebar (b)	Tinggi (h)						
	m	m		m ²	m	m ³	m ⁴	m ⁴
1	6,4000	0,4500	1,0000	2,8800	3,5750	10,2960	36,8082	0,0486
2	0,6000	0,3500	2,0000	0,4200	3,6250	1,5225	5,5191	0,0043
3	0,6000	0,1000	2,0000	0,0600	3,4167	0,2050	0,7004	0,0001
4	0,4500	3,0000	2,0000	2,7000	1,8500	4,9950	9,2407	2,0250
5	5,0000	0,3500	1,0000	1,7500	0,1750	0,3063	0,0536	0,0179
6	0,8000	0,2000	2,0000	0,1600	3,2833	0,5253	1,7248	0,0007
7	0,8000	0,2000	2,0000	0,1600	0,4167	0,0667	0,0278	0,0007
8	0,3500	0,3500	2,0000	0,1225	0,2333	0,0286	0,0067	0,0017
$\Sigma =$				8,2525		17,9453	54,0813	2,0989

Dari Tabel 4.3. diatas, didapatkan beberapa hasil parameter geometri untuk penampang *box girder* antara lain :

$$\begin{aligned}
 \text{Luas tampang } (\Sigma A) &= 8,2525 \text{ m}^2 \\
 \text{Statis momen } (\Sigma Axy) &= 17,9453 \text{ m}^3 \\
 \text{Inersia momen } (\Sigma Axy^2) &= 54,0813 \text{ m}^4 \\
 \text{Inersia momen } (I_o) &= 2,0989 \text{ m}^4
 \end{aligned}$$

Perhitungan letak titik berat penampang *box girder* serta momen tahanannya adalah sebagai berikut :

$$\text{Tinggi total box girder (H)} = 3,8000 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang box girder (A)} = 8,2525 \text{ m}^2$$

a. Letak titik berat :

$$\begin{aligned} y_b &= \Sigma A \times y / \Sigma A \\ &= 17,9453 / 8,2525 \\ &= 2,1745 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_a &= H - y_b \\ &= 3,8000 - 2,1745 \\ &= 1,6255 \text{ m} \end{aligned}$$

b. Momen inersia terhadap alas balok :

$$\begin{aligned} I_b &= \Sigma A \times y^2 / \Sigma I_o \\ &= 54,0813 / 2,0989 \\ &= 56,1802 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

c. Momen inersia terhadap titik berat balok :

$$\begin{aligned} I_x &= I_b - A \times y_b^2 \\ &= 56,1802 - 8,2525 \times (2,1745)^2 \\ &= 56,1802 - 8,2525 \times (4,7285) \\ &= 17,1575 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

d. Tahanan momen sisi atas :

$$\begin{aligned} W_a &= I_x / y_a \\ &= 17,1575 / 1,6255 \\ &= 10,5554 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

e. Tahanan momen sisi bawah :

$$\begin{aligned} W_b &= I_x / y_b \\ &= 17,1575 / 2,1745 \\ &= 7,8902 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

4.4. Analisis Pembebanan

Perhitungan pembebanan *box girder* untuk jembatan kereta api berpedoman P.M nomor 60 tahun 2012 meliputi berat sendiri balok prategang, beban mati, beban hidup, beban angin, pengaruh temperatur, gaya rem dan beban gempa.

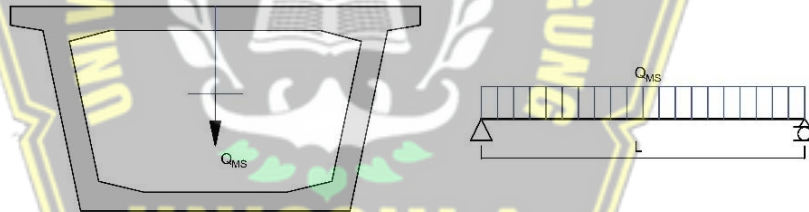
4.4.1. Berat Sendiri Balok Prategang (MSB)

Berdasarkan perhitungan *section properties* penampang box girder, diketahui luas penampang $A = 8,2525 \text{ m}^2$ dan berat beton prategang $= 25,5000 \text{ kN/m}^3$. Maka diperoleh berat sendiri balok prategang sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q_{\text{balok}} &= A \times w_c \\ &= 8,2525 \times 25,5000 \\ &= 210,4388 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

4.4.2. Berat Sendiri (MS)

Bahan dan komponen yang menjadi bagian pemberi beban pada struktur jembatan, diperhitungkan sebagai berat sendiri. Dalam perencanaan kali ini, berat sendiri yang diperhitungkan antara lain berat sendiri balok prategang, pagar tepi dan trotoar.



Gambar 4.5. Beban sendiri (MS)

a. Beban pagar tepi

$$\begin{aligned} &= 2 \times (\text{lebar} \times \text{tinggi} \times \text{berat}) \\ &= 2 \times (0,2500 \times 1,0000 \times 24,0000) \\ &= 12,0000 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

b. Beban trotoar

$$\begin{aligned} &= 2 \times (\text{lebar} \times \text{tinggi} \times \text{berat}) \\ &= 2 \times (0,7500 \times 0,3000 \times 24,0000) \\ &= 10,8000 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{c. } Q_{\text{balok}} &= A \times w_c \\
 &= 8,2525 \times 25,5000 \\
 &= 210,4388 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

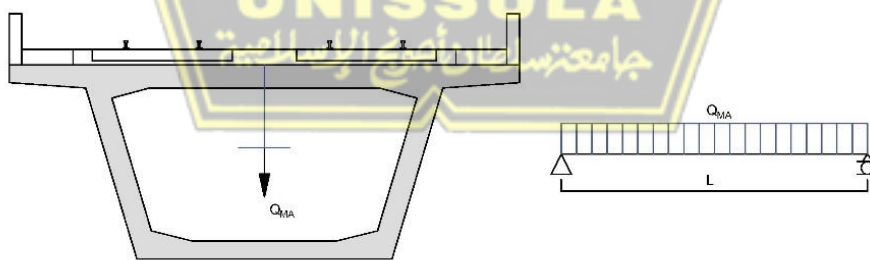
Berikut adalah rekap hasil perhitungan berat sendiri, dirangkum dalam Tabel 4.4. berikut ini.

Tabel 4.4. Rekap berat sendiri (Q_{MS})

No	Jenis berat sendiri	Berat (kN/m)
1.	Beban pagar tepi	12,0000
2.	Beban trotoar	10,8000
3.	Q_{balok}	210,4388
Total Q_{MS}		233,2388

4.4.3. *Beban Mati Tambahan (MA)*

Perhitungan beban mati tambahan merupakan berat tambahan dari pemberi beban pada struktur jembatan namun tidak tetap perletakkannya. Dengan kata lain beberapa beban mati tambahan dapat berubah sewaktu-waktu baik itu jenis komponen maupun jumlah komponennya seiring berjalannya waktu. Pada struktur jembatan kereta api, jembatan terbebani dengan beberapa jenis beban mati tambahan antara lain genangan air hujan, rel, bantalan dan lapisan balas.



Gambar 4.6. Beban mati tambahan (MA)

$$\begin{aligned}
 \text{a. Beban genangan air hujan} &= \text{tebal genangan} \times \text{lebar} \times \text{berat jenis air} \\
 &= 0,1000 \times 7,6000 \times 9,8000 \\
 &= 7,4480 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

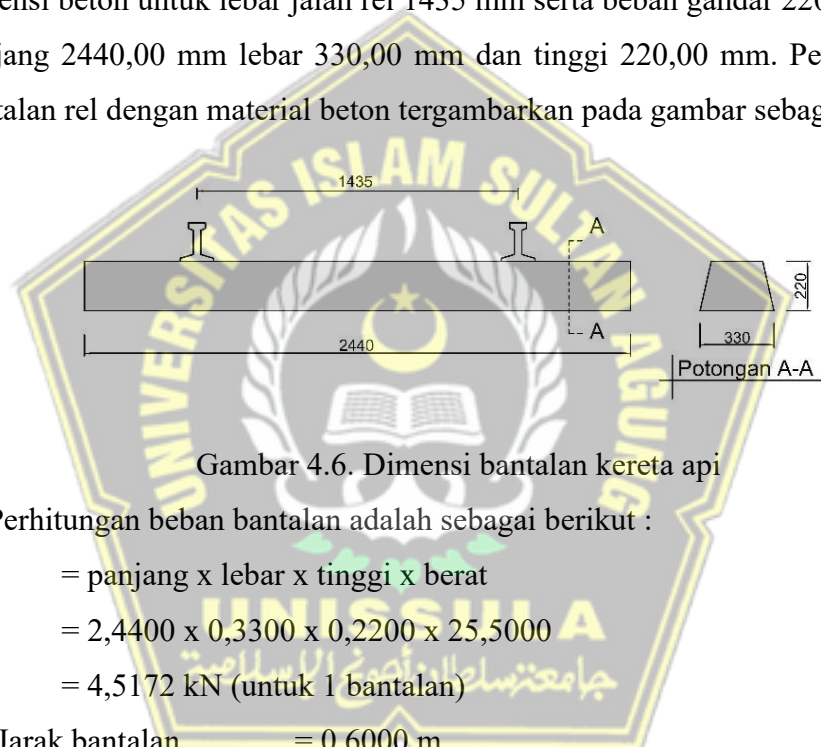
b. Beban lapisan balas

Berdasarkan PM nomor 60 tahun 2012, syarat tebal lapisan balas untuk lebar rel 1435 mm pada kelas jalan I adalah 30 cm.

$$\begin{aligned} &= p \times \text{tebal} \times \text{berat} \\ &= 5,6000 \times 0,3000 \times 19,0000 \\ &= 31,9200 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

c. Beban bantalan

Ukuran bantalan beton disesuaikan dengan PM nomor 60 tahun 2012. Standar dimensi beton untuk lebar jalan rel 1435 mm serta beban gandar 220 kN adalah panjang 2440,00 mm lebar 330,00 mm dan tinggi 220,00 mm. Pendimensian bantalan rel dengan material beton tergambarkan pada gambar sebagai berikut.



Gambar 4.6. Dimensi bantalan kereta api

Perhitungan beban bantalan adalah sebagai berikut :

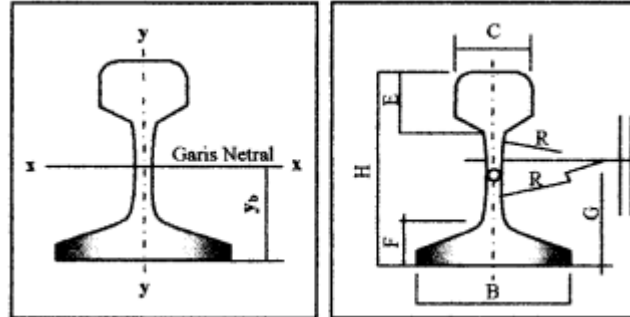
$$\begin{aligned} &= \text{panjang} \times \text{lebar} \times \text{tinggi} \times \text{berat} \\ &= 2,4400 \times 0,3300 \times 0,2200 \times 25,5000 \\ &= 4,5172 \text{ kN (untuk 1 bantalan)} \end{aligned}$$

$$\text{Jarak bantalan} = 0,6000 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \text{Beban bantalan} &= \frac{w_{\text{bantalan}} \times \text{jumlah bantalan}}{\text{panjang jembatan}} \times \text{jumlah jalur} \\ &= \frac{4,5172 \times 80 / 0,6000}{80} \times 2 \\ &= 15,0573 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

d. Beban rel

Tipe rel yang digunakan adalah R60 yang memiliki berat rel permeter sebesar 60,3400 kg/m atau 0,5917 kN/m sesuai ketentuan PM nomor 60 tahun 2012.



Gambar 4.7. Penampang rel

Perhitungan beban bantalan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} &= (2 \times 0,5917) \times \text{jumlah jalur} \\ &= 1,1834 \times 2 \\ &= 2,3668 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Berikut adalah rekap hasil perhitungan beban mati tambahan, dirangkum dalam Tabel 4.5. berikut ini.

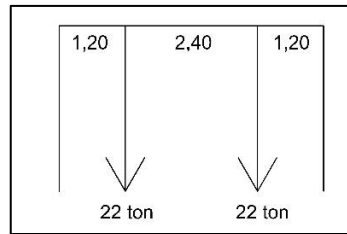
Tabel 4.5. Rekap beban mati tambahan (Q_{MA})

No	Jenis beban mati tambahan	Berat (kN/m)
1.	Beban genangan air hujan	7,4480
2.	Beban lapisan balas	31,9200
3.	Beban bantalan	15,0573
4.	Beban rel	2,3668
Total Q_{MA}		56,7921

4.4.4. Beban Lajur (TD)

Pembebanan lalu lintas kendaraan pada struktur jembatan yang diperhitungkan adalah kendaraan kereta api dengan beban gandar kereta rencana yaitu sebesar 22 ton atau 220 kN. Perhitungan yang dilakukan untuk menemukan beban hidup menggunakan garis pengaruh sebagai berikut :

Mengacu Skema Pembebanan Rencana Muatan 1921 (RM 21), untuk muatan gerak bila dengan kereta yang banyaknya tidak tertentu, serupa demikian :

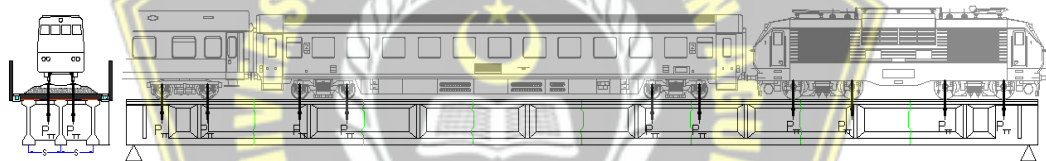


Gambar 4.8. Skema pembebanan dengan kereta yang banyaknya tidak tertentu

Dengan jumlah beban 44 ton, didapat beban merata sebagai berikut :

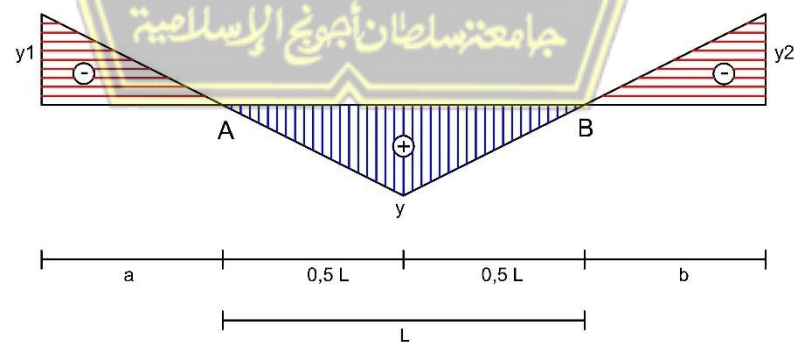
$$\begin{aligned} q &= \text{beban} / \text{jarak} \\ &= 44 / 4,8000 \\ &= 9,1667 \text{ ton/m} = 91,6700 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Perhitungan beban berjalan ditinjau pada keseluruhan bentang jembatan dengan asumsi seluruh bentang terbebani oleh kereta.



Gambar 4.9. Skema beban berjalan

Momen :



Gambar 4.10. Garis pengaruh momen terbesar

$$\text{Ordinat } y = \frac{0,5L \times 0,5L}{L} = \frac{40 \times 40}{80} = 20$$

$$\frac{y}{y+y_1} = \frac{0,5L}{0,5L+a} \quad \text{diperoleh} \quad y_1 = 20 \text{ m}$$

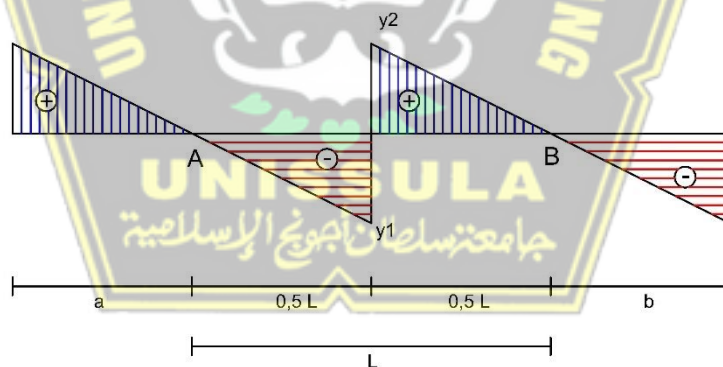
$$\frac{y}{y+y_2} = \frac{0,5L}{0,5L+b} \quad \text{diperoleh} \quad y_2 = 20 \text{ m}$$

Momen maksimum akan diperoleh dari hasil perkalian luas diagram dengan $q = 91,67 \text{ kN/m}$.

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum positif (+)} &= q \times (\text{luas diagram positif}) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times L \times y) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times 80 \times 20) \\ &= 73336,00 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Momen maksimum negatif (-)} &= q \times (\text{luas diagram negatif}) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times 0,5L \times y_1) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times 40 \times (-20)) \\ &= -36668,00 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Lintang :



Gambar 4.11. Garis pengaruh lintang

Ordinat :

$$y_1 = \frac{0,5L-L}{L} = \frac{40-80}{80} = 0,5$$

$$y_2 = \frac{0,5L-L}{L} = \frac{40-80}{80} = 0,5$$

Lintang maksimum akan diperoleh dari hasil perkalian luas diagram dengan $q = 91,67 \text{ kN/m}$.

$$\begin{aligned}\text{Lintang maksimum positif (+)} &= q \times (\text{luas diagram positif}) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times 0,5L \times y_2) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times 40 \times 0,5) \\ &= 916,70 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Lintang maksimum negatif (-)} &= q \times (\text{luas diagram negatif}) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times 0,5L \times y_1) \\ &= 91,67 \times (0,5 \times 40 \times (-0,5)) \\ &= -916,70 \text{ kN}\end{aligned}$$

4.4.5. Gaya Rem (TB)

Gaya rem adalah beban yang bekerja longitudinal memanjang ke arah rel. Pengaruh dari gaya-gaya dalam yang bekerja akibat pengereman harus ditinjau. Beban pengereman menurut PM No.60 tahun 2012 adalah 25% dari beban kereta. Perhitungan gaya rem adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}T_{TB} &= 25\% \times \text{beban kereta} \\ &= 25\% \times 916,70 \\ &= 229,1750 \text{ kN}\end{aligned}$$

4.4.6. Beban Angin (EW)

Beban yang beraksi secara horizontal, tegak lurus terhadap rel akibat adanya tekanan angin. Gaya angin yang bekerja meniup kendaraan pada lantai jembatan diperhitungkan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$T_{EW} = 0,0012 \times C_w \times (V_w)^2 \dots \dots \dots (2.17)$$

C_w = koefisien seret

V_w = kecepatan angin rencana (m/s)

Nilai V_w dan C_w dapat ditentukan melalui Tabel sebagai berikut.

Tabel 4.6. Kecepatan angin rencana

Keadaan Batas	Lokasi	
	Sampai 5 km dari pantai	> 5 km dari pantai
Daya layan	30 m/s	25 m/s
Ultimit	35 m/s	30 m/s

Dipakai kecepatan angin rencana (V_w) = 35 m/s

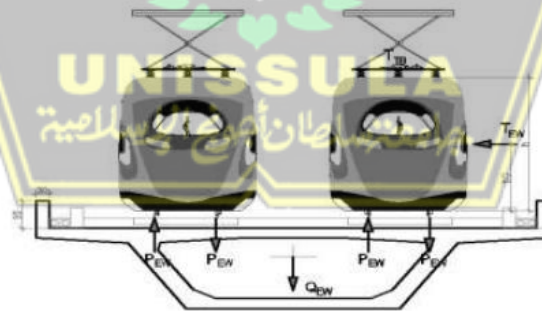
Tabel 4.7. Nilai koefisien seret

Tipe Jembatan	C_w
Bangunan atas masif: (1), (2)	
$b/d = 1.0$	2.1 (3)
$b/d = 2.0$	1.5 (3)
$b/d \geq 6.0$	1.25 (3)
Bangunan atas rangka	1.2
CATATAN (1) b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar sandaran d = tinggi bangunan atas, termasuk tinggi bagian sandaran yang masif CATATAN (2) Untuk harga antara dari b/d bisa di interpolasi linier CATATAN (3) Apabila bangunan atas mempunyai superelevasi, C_w harus dinaikkan sebesar 3 % untuk setiap derajat superelevasi, dengan kenaikan maksimum 2,5 %	

Tipe jembatan untuk penentuan koefisien seret didapatkan dari hasil bagi antara lebar total jembatan (b) dengan tinggi total bangunan struktur atas termasuk tinggi pagar tepi (d).

$$b/d = 7,60 / 4,80 = 1,5833$$

Dipakai nilai koefisien seret (C_w) = 1,5



Gambar 4.12. Beban angin (EW)

Maka,

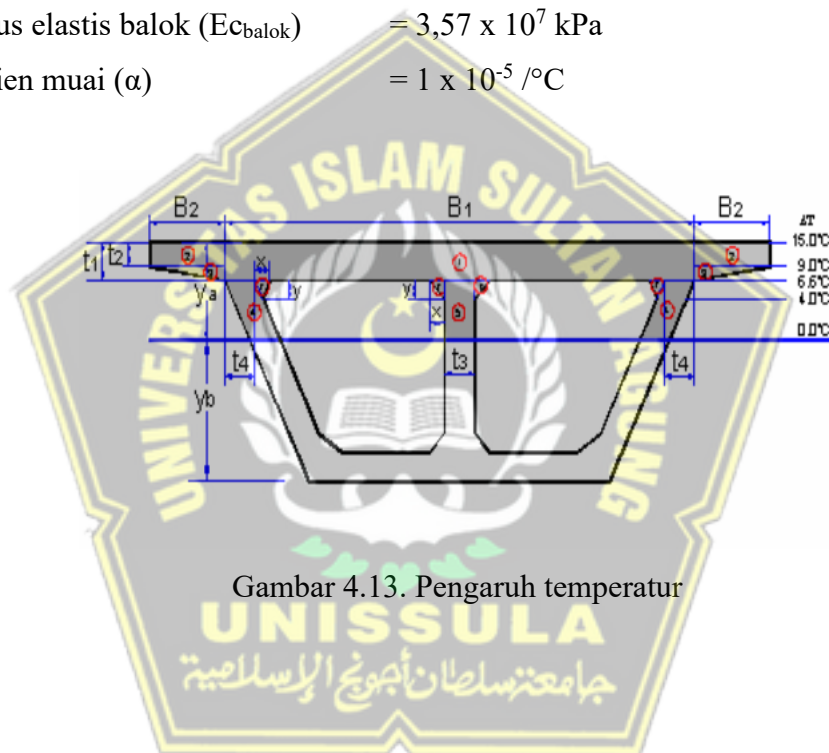
$$\begin{aligned}
 T_{EW} &= 0,0012 \times C_w \times (V_w)^2 \dots\dots\dots(2.17) \\
 &= 0,0012 \times 1,50 \times (35)^2 \\
 &= 2,2050 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Rencana bidang samping kendaraan yang tertiuip angin direncanakan dengan tinggi 3,00 m diatas lantai jembatan dan jarak antar roda kendaraan (x) = 1,50 m. Perhitungan beban angin terhadap kendaraan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 Q_{EW} &= 2 \times [(\frac{1}{2} \times h) / x \times T_{EW}] \dots\dots\dots(2.18) \\
 &= 2 \times [(\frac{1}{2} \times 3) / 1,50 \times 2,2050] \\
 &= 4,4100 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

4.4.7. Pengaruh Temperatur (ET)

Perbedaan temperatur (ΔT) = 15 °C
 Modulus elastis balok ($E_{c\text{balok}}$) = 3,57 x 10⁷ kPa
 Koefisien muai (α) = 1 x 10⁻⁵ /°C



Gambar 4.13. Pengaruh temperatur

Gaya internal akibat perbedaan temperatur : $P_t = A_t \times E_{\text{balok}} \times \alpha \times (T_a + T_b)/2 \dots \dots \dots (2.19)$

Tabel 4.8. Pengaruh temperatur

No	Lebar	Tebal	Luas	Temperatur		P_t	Lengan terhadap titik berat penampang balok komposit	z_i	Momen
	b	h	A_t	Atas	Bawah				M_{pt}
	(m)	(m)	(m^2)	($^{\circ}C$)	($^{\circ}C$)			(m)	(kN-m)
0	6,4000	0,4500	2,8800	15,0000	6,6000	11095	$z_0 = y_{ac}-h_0/2$	1,4005	15538
1	0,6000	0,3500	0,4200	15,0000	9,0000	1798	$z_1 = y_{ac}-h_1/2$	1,4505	2608
2	0,6000	0,1000	0,0600	9,0000	6,6000	167	$z_2 = y_{ac}-h_2/3$	1,5921	266
3	0,4500	1,1755	1,0579	6,6000	0,0000	1245	$z_3 = y_{ac}-h_0-h_3/2$	0,5877	732
4	0,0000	1,1755	0,0000	6,6000	0,0000	0	$z_4 = y_{ac}-h_0-h_4/2$	0,5877	0
5	0,8000	0,2000	0,1600	6,6000	4,0000	302	$z_5 = y_{ac}-h_0-h_5/3$	1,0755	325
$\Sigma P_t =$						14607		$\Sigma M_{Pt} =$	19468

Eksentrisitas (e_p)

$$= \Sigma M_{Pt} / \Sigma P_t$$

$$= 19468 / 14607$$

$$= 1,3328 \text{ m}$$

Beban momen akibat temperatur disepanjang bentang,

$$= \Sigma M_{Pt} / L = 19468 / 80 = 243,3500 \text{ kN-m/m}$$

4.4.8. Beban Gempa (EQ)

Data-data perencanaan perhitungan beban gempa untuk jembatan kereta api disesuaikan dengan lokasi proyek yaitu di Kota Makassar, Sulawesi Selatan. Berdasarkan keterangan gambar dan tabel pada SNI 2833:2016, diperoleh data perencanaan untuk perhitungan beban gempa sebagai berikut :

Koefisien percepatan:

PGA = 0,10 g.....(Gambar 1. SNI 2833:2016)

S_s = 0,25 g.....(Gambar 2. SNI 2833:2016)

S_1 = 0,10 g.....(Gambar 3. SNI 2833:2016)

Dalam penentuan kelas situs, nilai F_a , F_v dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.9. Nilai koefisien F_a

Kelas situs	PGA ≤ 0,1 $S_s \leq 0.25$	PGA = 0,2 $S_s = 0.5$	PGA = 0,3 $S_s = 0.75$	PGA = 0,4 $S_s = 1.0$	PGA > 0,5 $S_s \geq 1.25$
Batuan Keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tanah Keras (SC)	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
Tanah Sedang (SD)	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
Tanah Lunak (SE)	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

(Sumber: SNI 2833:2016)

Tabel 4.10. Nilai koefisien F_v

Kelas situs	$S_f \leq 0.1$	$S_f = 0.2$	$S_f = 0.3$	$S_f = 0.4$	$S_f \geq 0.5$
Batuan Keras (SA)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Batuan (SB)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Tanah Keras (SC)	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
Tanah Sedang (SD)	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
Tanah Lunak (SE)	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
Tanah Khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

(Sumber: SNI 2833:2016)

Dengan ditentukannya kelas situs C, diperoleh :

F_a = 1,20

F_v = 1,70

Dari beberapa nilai koefisien percepatan, faktor situs, kemudian dapat diketahui kategori kinerja seismik melalui perhitungan sebagai berikut:

$$S_{D1} = F_v \times S_1$$

$$= 1,7 \times 0,1$$

$$= 0,17$$

$$S_{DS} = F_a \times S_s$$

$$= 1,2 \times 0,2$$

$$= 0,24$$

Tabel 4.11. Zona gempa

Koefisien percepatan (S_{D1})	Zona gempa
$S_{D1} \leq 0,15$	1
$0,15 < S_{D1} \leq 0,30$	2
$0,30 < S_{D1} \leq 0,50$	3
$S_{D1} > 0,50$	4

(Sumber: SNI 2833:2016)

Nilai S_{D1} diatas menunjukkan bahwa rencana lokasi jembatan terletak pada zona gempa 2. Karena lokasi jembatan tidak terletak pada zona gempa 1, maka perlu menentukan faktor modifikasi respons (R) untuk dapat mengetahui gaya dalam rencana. Penentuan faktor modifikasi respon (R) didapatkan melalui tabel sebagai berikut :

Tabel 4.12. Faktor modifikasi respon (R)

Hubungan elemen struktur	Semua kategori kepentingan
Bangunan atas dengan kepala jembatan	0,8
Sambungan muai (dilatasi) pada bangunan atas	0,8
Kolom, pilar, atau tiang dengan bangunan atas	1,0
Kolom atau pilar dengan fondasi	1,0

(Sumber: SNI 2833:2016)

Didapatkan nilai $R = 1$

Berat total :

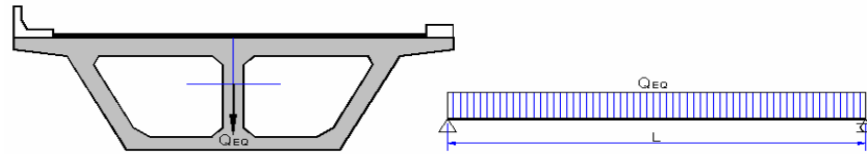
$$\begin{aligned}
 W_t &= (Q_{MS} + Q_{MA}) \times L \\
 &= (233,2388 + 56,7921) \times 80 \\
 &= 23202,4720 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Gaya dalam rencana didapatkan dengan hasil bagi antara gaya gempa elastis dengan faktor modifikasi respons (R). Untuk $T_0 \leq T \leq T_s$, maka percepatan respon spektra $C_{sm} = S_{DS}$. Persamaan untuk mencari gaya dalam rencana adalah :

$$\begin{aligned}
 EQ &= \frac{C_{sm}}{R} \times W_t \dots\dots\dots (SNI 2833:2016) \\
 &= \frac{0,24}{1} \times 23202,4720 \\
 &= 5568,5933 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Rencana gaya gempa vertikal :

$$\begin{aligned} T_{EQ} &= 0,10 \times W_t \dots\dots\dots(\text{SNI 2833:2016}) \\ &= 0,10 \times 23202,4720 \\ &= 2320,2472 \text{ kN} \end{aligned}$$



Gambar 4.14. Beban gempa

Perhitungan gaya gempa vertikal adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q_{EQ} &= T_{EQ} / L \\ &= 2320,2472 / 80 \\ &= 33,5059 \text{ kN/m} \end{aligned}$$



4.5. Kombinasi Pembebanan

Perhitungan besaran momen dan geser yang terjadi pada balok prategang dibantu dengan program Excel. Hasil perhitungan momen, geser beserta kombinasi dirangkum pada Tabel 4.15. sampai dengan Tabel 4.18. Resume beban jembatan beserta faktornya adalah :

Tabel 4.13. Faktor beban

No.	Jenis Beban	Faktor Beban	Beban	Komb-1	Komb-2	Komb-3	Komb-4	Komb-5
1.	Berat sendiri (MS)	1,20	233,2388	279,8866	279,8866	279,8866	279,8866	279,8866
	Berat sendiri balok (MS1)	1,00	210,4388	210,4388	210,4388	210,4388	210,4388	210,4388
2.	Beban mati tambahan (MA)	1,20	56,7921	68,1505	68,1505	68,1505	68,1505	68,1505
3.	Beban lajur (PTD)	1,20	916,7000	1100,0400	1100,0400	1100,0400	1100,0400	-
4.	Gaya rem (TB)	1,00	229,1750	-	229,1750	229,1750	-	-
5.	Beban angin (EW)	1,20	4,4100	-	-	5,2920	5,2920	-
6.	Pengaruh temperatur (ET)	1,00	243,3500	-	243,3500	-	243,3500	-
7.	Beban gempa (EQ)	1,00	33,5059	-	-	-	-	33,5059

Untuk mencari besaran momen dan gaya geser, dapat diperoleh dengan persamaan dibawah ini :

Tabel 4.14. Persamaan momen dan gaya geser

No	Jenis Beban	Persamaan Momen	Persamaan Gaya Geser
1.	Berat sendiri (MS)	$M_{XMS} = \frac{1}{2} Q_{MS} (L x - x^2)$	$V_{XMS} = Q_{MS} (L/2 - x)$
2.	Beban mati tambahan (MA)	$M_{XMA} = \frac{1}{2} Q_{MA} (L x - x^2)$	$V_{XMS} = Q_{MA} (L/2 - x)$
3.	Beban lajur “D” (TD)	$M_{XTD} = \frac{1}{2} Q_{TD} (L x - x^2) + (1/2 P_{TD} x)$	$V_{XMS} = Q_{TD} (L/2 - x) + (P_{TD}/2)$
4.	Beban rem (TB)	$M_{XTB} = (x/L) M_{TB}$	$V_{XMS} = M_{TB}/L$
5.	Beban angin (EW)	$M_{XEW} = \frac{1}{2} Q_{EW} (L x - x^2)$	$V_{XMS} = Q_{EW} (L/2 - x)$
6.	Beban temperatur (ET)	$M_{XET} = (x/L) M_{ET}$	$V_{XMS} = M_{ET}/L$
7.	Beban gempa (EQ)	$M_{XEQ} = \frac{1}{2} Q_{EQ} (L x - x^2)$	$V_{XMS} = Q_{EQ} (L/2 - x)$

Tabel 4.15. Momen pada balok prategang

No.	Jarak	Momen pada balok prategang akibat beban							
	x	Berat balok	Berat sendiri	Mati tambahan	Lajur “D”	Rem	Angin	Temperatur	Gempa
	(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
0.	0	0,0000	0,0000	0,0000	-36668,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1.	8	13468,0832	17912,7398	4361,6333	-29334,4000	22,9175	338,6880	24,3350	2144,3776
2.	16	8978,7221	11941,8266	2907,7555	-22000,8000	45,8350	225,7920	48,6700	1429,5851
3.	24	-13468,0832	-17912,7398	-4361,6333	-14667,2000	68,7525	-338,6880	73,0050	-2144,3776

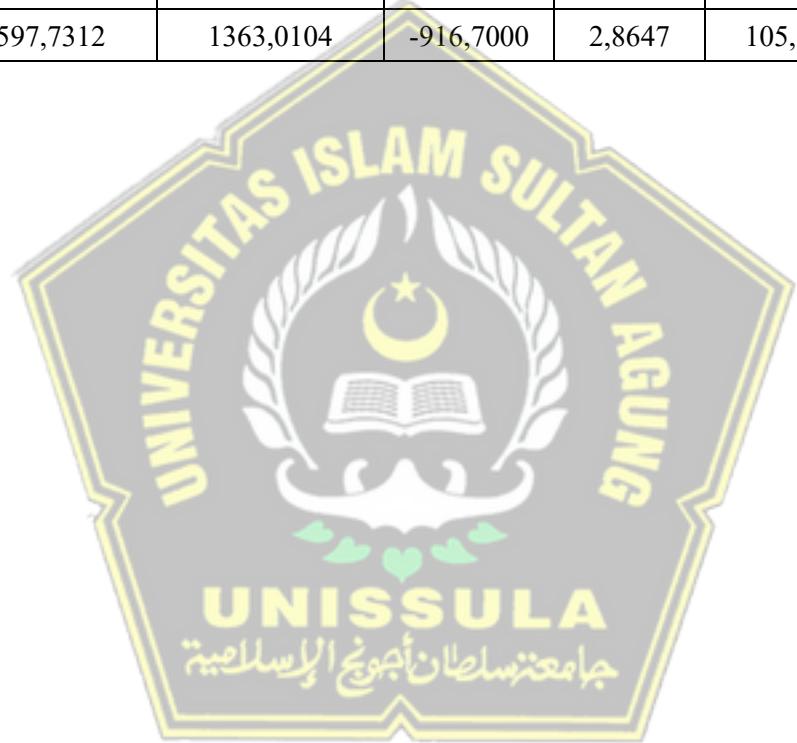
4.	32	-53872,3328	-71650,9594	-17446,5331	-7333,6000	91,6700	-1354,7520	97,3400	-8577,5104
5.	40	-112234,0267	-149272,8320	-36346,9440	0,0000	114,5875	-2822,4000	121,6750	-17869,8133
6.	48	-44893,6107	-59709,1328	-14538,7776	26400,9600	137,5050	-1128,9600	146,0100	-7147,9253
7.	56	7482,2684	9951,5221	2423,1296	46935,0400	160,4225	188,1600	170,3450	1191,3209
8.	64	44893,6107	59709,1328	14538,7776	61602,2400	183,3400	1128,9600	194,6800	7147,9253
9.	72	67340,4160	89563,6992	21808,1664	70402,5600	206,2575	1693,4400	219,0150	10721,8880
10.	80	74822,6844*	99515,2213	24231,2960	73336,0000	229,1750	1881,6000	243,3500	11913,2089
11.	88	67340,4160	89563,6992	21808,1664	70402,5600	206,2575	1693,4400	219,0150	10721,8880
12.	96	44893,6107	59709,1328	14538,7776	61602,2400	183,3400	1128,9600	194,6800	7147,9253
13.	104	7482,2684	9951,5221	2423,1296	46935,0400	160,4225	188,1600	170,3450	1191,3209
14.	112	-44893,6107	-59709,1328	-14538,7776	26400,9600	137,5050	-1128,9600	146,0100	-7147,9253
15.	120	-112234,0267	-149272,8320	-36346,9440	0,0000	114,5875	-2822,4000	121,6750	-17869,8133
16.	128	-53872,3328	-71650,9594	-17446,5331	-7333,6000	91,6700	-1354,7520	97,3400	-8577,5104
17.	136	-33670,2080	-44781,8496	-10904,0832	-14667,2000	68,7525	-846,7200	73,0050	-5360,9440
18.	144	-17957,4443	-23883,6531	-5815,5110	-22000,8000	45,8350	-451,5840	48,6700	-2859,1701
19.	152	-6734,0416	-8956,3699	-2180,8166	-29334,4000	22,9175	-169,3440	24,3350	-1072,1888
20.	160	0,0000	0,0000	0,0000	-36668,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

*menunjukkan nilai momen maksimum akibat berat sendiri.

Tabel 4.16. Gaya geser pada balok prategang

No.	Jarak	Lintang pada balok prategang akibat beban							
	x	Berat balok	Berat sendiri	Mati tambahan	Lajur "D"	Rem	Angin	Temperatur	Gempa
	(m)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
0.	0	3156,5820	4198,2984	1022,2578	916,7000	2,8647	79,3800	3,0419	502,5885
1.	8	1473,0716	1959,2059	477,0536	586,6880	2,8647	37,0440	3,0419	234,5413
2.	16	-210,4388	-279,8866	-68,1505	330,0120	2,8647	-5,2920	3,0419	-33,5059
3.	24	-1893,9492	-2518,9790	-613,3547	146,6720	2,8647	-47,6280	3,0419	-301,5531
4.	32	-3577,4596	-4758,0715	-1158,5588	36,6680	2,8647	-89,9640	3,0419	-569,6003
5.	40	-5260,9700	-6997,1640	-1703,7630	0,0000	2,8647	-132,3000	3,0419	-837,6475
6.	48	6776,1294	9012,3472	2194,4467	-36,6680	2,8647	170,4024	3,0419	1078,8900
7.	56	5092,6190	6773,2548	1649,2426	-146,6720	2,8647	128,0664	3,0419	810,8428
8.	64	3409,1086	4534,1623	1104,0384	-330,0120	2,8647	85,7304	3,0419	542,7956
9.	72	1725,5982	2295,0698	558,8343	-586,6880	2,8647	43,3944	3,0419	274,7484
10.	80	42,0878	55,9773	13,6301	-916,7000	2,8647	1,0584	3,0419	6,7012
11.	88	-1641,4226	-2183,1152	-531,5741	586,6880	2,8647	-41,2776	3,0419	-261,3460
12.	96	-3324,9330	-4422,2076	-1076,7782	330,0120	2,8647	-83,6136	3,0419	-529,3932
13.	104	-5008,4434	-6661,3001	-1621,9824	146,6720	2,8647	-125,9496	3,0419	-797,4404
14.	112	-6691,9538	-8900,3926	-2167,1865	36,6680	2,8647	-168,2856	3,0419	-1065,4876
15.	120	-8375,4642	-11139,4851	-2712,3907	0,0000	2,8647	-210,6216	3,0419	-1333,5348

16.	128	6734,0416	8956,3699	2180,8166	-36,6680	2,8647	169,3440	3,0419	1072,1888
17.	136	6102,7252	8116,7102	1976,3651	-146,6720	2,8647	153,4680	3,0419	971,6711
18.	144	5471,4088	7277,0506	1771,9135	-330,0120	2,8647	137,5920	3,0419	871,1534
19.	152	4840,0924	6437,3909	1567,4620	-586,6880	2,8647	121,7160	3,0419	770,6357
20.	160	4208,7760	5597,7312	1363,0104	-916,7000	2,8647	105,8400	3,0419	670,1180



Setelah mengetahui besaran momen dan gaya geser, kemudian dihitung besarnya beban kombinasi pembebanan jembatan dengan rumus berikut ini :

$$\text{Kombinasi 1} = \text{MS} + \text{MA} + \text{TD} + \text{TB}$$

$$\text{Kombinasi 2} = \text{MS} + \text{MA} + \text{TD} + \text{TB} + \text{ET}$$

$$\text{Kombinasi 3} = \text{MS} + \text{MA} + \text{TD} + \text{TB} + \text{EW}$$

$$\text{Kombinasi 4} = \text{MS} + \text{MA} + \text{TD} + \text{TB} + \text{EW} + \text{ET}$$

$$\text{Kombinasi 5} = \text{MS} + \text{MA} + \text{EQ}$$

Tabel 4.17. Bidang momen pada balok akibat beban kombinasi

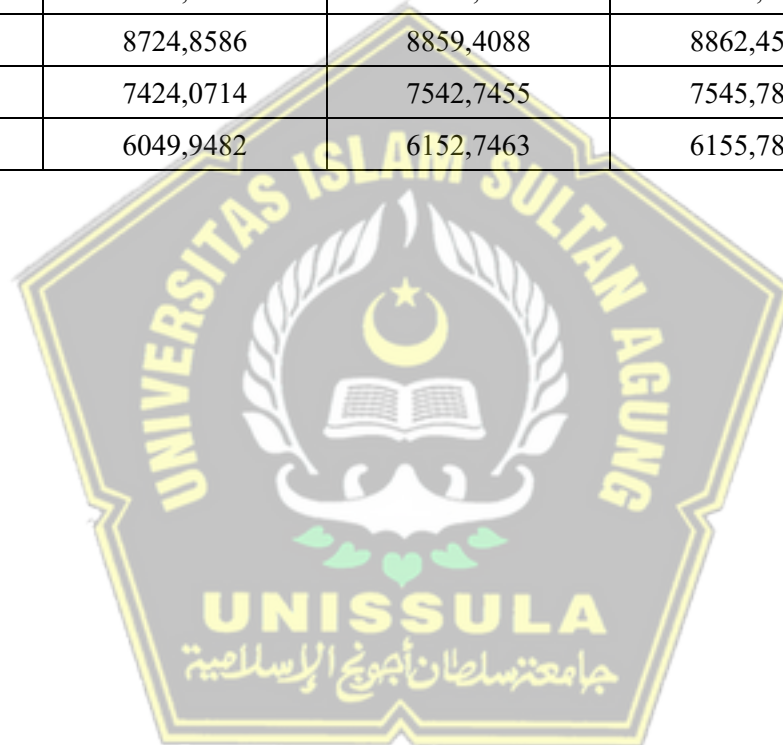
Jarak	Bidang momen pada balok akibat beban kombinasi				
x	KOMB.I	KOMB.II	KOMB.III	KOMB.IV	KOMB.V
	(MS + MA + TD + TB)	(MS + MA + TD + TB + ET)	(MS + MA + TD + TB + EW)	(MS + MA + TD + TB + EW + ET)	(MS + MA + EQ)
(m)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)	(kNm)
0,00	-36668,0000	-36668,0000	-36668,0000	-36668,0000	0,0000
8,00	-7037,1094	-7012,7744	-6698,4214	-6674,0864	24418,7507
16,00	-7105,3829	-7056,7129	-6879,5909	-6830,9209	16279,1671
24,00	-36872,8206	-36799,8156	-37211,5086	-37138,5036	-24418,7507

32,00	-96339,4225	-96242,0825	-97694,1745	-97596,8345	-97675,0029
40,00	-185505,1885	-185383,5135	-188327,5885	-188205,9135	-203489,5893
48,00	-47709,4454	-47563,4354	-48838,4054	-48692,3954	-81395,8357
56,00	59470,1142	59640,4592	59658,2742	59828,6192	13565,9726
64,00	136033,4904	136228,1704	137162,4504	137357,1304	81395,8357
72,00	181980,6831	182199,6981	183674,1231	183893,1381	122093,7536
80,00	197311,6923	197555,0423	199193,2923	199436,6423	135659,7262
88,00	181980,6831	182199,6981	183674,1231	183893,1381	122093,7536
96,00	136033,4904	136228,1704	137162,4504	137357,1304	81395,8357
104,00	59470,1142	59640,4592	59658,2742	59828,6192	13565,9726
112,00	-47709,4454	-47563,4354	-48838,4054	-48692,3954	-81395,8357
120,00	-185505,1885	-185383,5135	-188327,5885	-188205,9135	-203489,5893
128,00	-96339,4225	-96242,0825	-97694,1745	-97596,8345	-97675,0029
136,00	-70284,3803	-70211,3753	-71131,1003	-71058,0953	-61046,8768
144,00	-51654,1292	-51605,4592	-52105,7132	-52057,0432	-32558,3343
152,00	-40448,6691	-40424,3341	-40618,0131	-40593,6781	-12209,3754
160,00	-36668,0000	-36668,0000	-36668,0000	-36668,0000	0,0000

Tabel 4.18. Bidang geser pada balok akibat beban kombinasi

Jarak	Bidang geser pada balok akibat beban kombinasi				
x	KOMB.I	KOMB.II	KOMB.III	KOMB.IV	KOMB.V
	(MS + MA + TD + TB)	(MS + MA + TD + TB + ET)	(MS + MA + TD + TB + EW)	(MS + MA + TD + TB + EW + ET)	(MS + MA + EQ)
(m)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
0,00	6140,1209	6143,1628	6219,5009	6222,5428	5723,1447
8,00	3025,8122	3028,8541	3062,8562	3065,8981	2670,8009
16,00	-15,1604	-12,1185	-20,4524	-17,4105	-381,5430
24,00	-2982,7970	-2979,7552	-3030,4250	-3027,3832	-3433,8868
32,00	-5877,0977	-5874,0558	-5967,0617	-5964,0198	-6486,2307
40,00	-8698,0623	-8695,0204	-8830,3623	-8827,3204	-9538,5745
48,00	11172,9907	11176,0325	11343,3931	11346,4349	12285,6840
56,00	8278,6900	8281,7319	8406,7564	8409,7983	9233,3401
64,00	5311,0534	5314,0953	5396,7838	5399,8257	6180,9963
72,00	2270,0807	2273,1226	2313,4751	2316,5170	3128,6524
80,00	-844,2279	-841,1860	-843,1695	-840,1276	76,3086
88,00	-2125,1365	-2122,0947	-2166,4141	-2163,3723	-2976,0352
96,00	-5166,1092	-5163,0673	-5249,7228	-5246,6809	-6028,3791
104,00	-8133,7458	-8130,7039	-8259,6954	-8256,6535	-9080,7229

112,00	-11028,0465	-11025,0046	-11196,3321	-11193,2902	-12133,0668
120,00	-13849,0111	-13845,9692	-14059,6327	-14056,5908	-15185,4106
128,00	11103,3832	11106,4251	11272,7272	11275,7691	12209,3754
136,00	9949,2680	9952,3099	10102,7360	10105,7779	11064,7464
144,00	8721,8168	8724,8586	8859,4088	8862,4506	9920,1175
152,00	7421,0295	7424,0714	7542,7455	7545,7874	8775,4885
160,00	6046,9063	6049,9482	6152,7463	6155,7882	7630,8596



4.6. Gaya Prategang, Eksentrisitas dan Jumlah Tendon

Pada beton prategang, pada dasarnya tegangan ditinjau dalam dua kondisi yang berbeda yaitu kondisi awal dan kondisi akhir. Kondisi awal adalah ketika transfer gaya prategang dengan tidak adanya beban eksternal. Saat kondisi awal, struktur tidak dibebani oleh beban eksternal atau dengan kata lain hanya menerima berat sendiri saja. Sedangkan kondisi akhir adalah ketika struktur telah terbebani oleh babn eksternal dan pada balok prategang telah terjadi kehilangan gaya prategang.

4.6.1. Kondisi Awal

Kondisi awal ditinjau ketika kondisi transfer atau saat pemberian gaya prategang. Perhitungan gaya prategang di kondisi awal ini dihitung dengan ditetapkan nilai z_0 (jarak titik berat tendon terhadap sisi bawah *box girder*) guna mengetahui nilai eksentrisitas. Perhitungan kondisi awal gaya prategang adalah :

Mutu beton K-500,

$$\begin{aligned} f_{c'} &= 0,83 \times K \times 100 \\ &= 0,83 \times 500 \times 100 \\ &= 41500,00 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Kuat tekan beton pada kondisi awal,

$$\begin{aligned} f_{ci'} &= 0,80 \times f_{c'} \\ &= 0,80 \times 41500,00 \\ &= 33200,00 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Tahanan momen sisi atas,

$$\begin{aligned} W_a &= I_x / y_a \\ &= 17,1575 / 1,6255 \\ &= 10,5554 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Tahanan momen sisi bawah,

$$\begin{aligned} W_b &= I_x / y_b \\ &= 17,1575 / 2,1745 \\ &= 7,8902 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Luas penampang balok prategang (lihat Tabel 4.2),

$$A_c = 8,2525 \text{ m}^2$$

Letak titik berat terhadap sisi bawah *box girder*,

$$\begin{aligned} y_b &= \Sigma A \times y / \Sigma A \\ &= 17,9453 / 8,2525 \\ &= 2,1745 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Direncanakan jarak titik berat tendon terhadap alas balok,

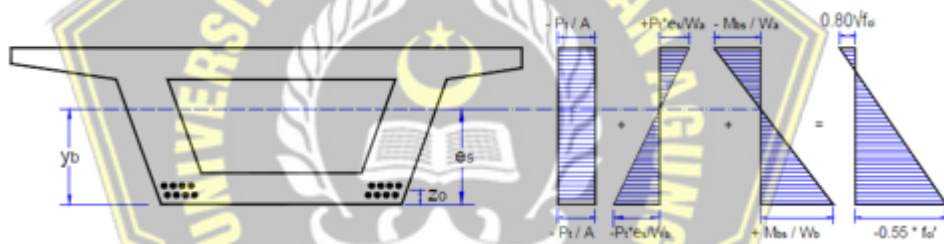
$$z_0 = 0,3000 \text{ m}$$

Eksentrisitas tendon,

$$\begin{aligned} e_s &= y_b - z_0 \\ &= 2,1745 - 0,3000 \\ &= 1,8745 \text{ m} \end{aligned}$$

Momen maksimum akibat berat sendiri balok (lihat Tabel 4.10),

$$M_{\text{balok}} = 74822,68 \text{ kNm}$$



Gambar 4.15. Tegangan pada *box girder*

a. Tegangan di serat atas

$$\begin{aligned} 0,25 \sqrt{f_{c'i}} &= -P_t / A_c + P_t \times e_s / W_a - M_{\text{balok}} / W_a \dots \dots \dots (2.3) \\ P_t &= (0,25 \sqrt{f_{c'i}} + M_{\text{balok}} / W_a) / (e_s / W_a - 1/A_c) \\ &= (0,25 \sqrt{33200} + 74822,68 / 10,5554) / (1,8745 / 10,5554 - 1/8,2525) \\ &= 64551,86 \text{ kN} \end{aligned}$$

b. Tegangan di serat bawah

$$\begin{aligned} 0,55 f_{c'i} &= -P_t / A_c - P_t \times e_s / W_b + M_{\text{balok}} / W_b \dots \dots \dots (2.4) \\ P_t &= (0,55 f_{c'i} + M_{\text{balok}} / W_b) / (e_s / W_b - 1/A_c) \\ &= (0,55 \times 33200 + 74822,68 / 7,8902) / (1,8745 / 7,8902 - 1/8,2525) \\ &= 77529,63 \text{ kN} \end{aligned}$$

Diambil besarnya gaya prategang pada kondisi awal 64551,86 kN.

4.6.2. Kondisi Akhir Gaya Prategang

Kondisi akhir gaya prategang ditinjau saat *service*. Perhitungan kondisi akhir gaya prategang ini diraih setelah mempertimbangkan kehilangan gaya prategang yang terjadi. Tendon terdiri dari beberapa *strands* sesuai standar VSL (sebuah perusahaan konstruksi internasional) dengan data sebagai berikut :

Tabel 4.19. Mutu baja *strands* standar VSL

Jenis strands : Uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270			
Tegangan leleh strand	$f_{py} =$	1581,00	Mpa
Kuat tarik strand	$f_{pu} =$	1860,00	Mpa
Diameter nominal strands,	$d_{ia} =$	12,70	mm
Luas tampang nominal satu strands,	$A_{ps} =$	98,71	mm ²
Beban putus minimal satu strands,	$P_{bs} =$	188,4317	kN [100% UTS]
Diameter selubung ideal	$=$	102,00	mm
Modulus elastis strands,	$E_{sp} =$	$1,93 \times 10^5$	MPa

Beban putus minimal satu strand,

$$P_{bs} = 188,4317 \text{ kN}$$

Jumlah strands cable yang diperlukan,

$$\begin{aligned}
 n_s &= P_t / (0,85 \times 0,80 \times P_{bs}) \\
 &= 64551,86 / (0,85 \times 0,80 \times 188,4317) \\
 &= 64551,86 / 128,1336 \\
 &= 503,786 \text{ strands} \approx \text{diambil } n_s = 504 \text{ strands.}
 \end{aligned}$$

Sebagai dasar perhitungan, dipakai 30 kawat untaian tiap tendon. Sehingga $504/30 = 16,8 \approx$ dipakai 18 tendon disebar kiri dan kanan pada penampang *box girder*.

Beban putus satu tendon,

$$\begin{aligned}
 P_{b1} &= 30 \times 188,4317 \\
 &= 5652,9510 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Tabel 4.20. Rencana jumlah tendon dan strands

n1	6	Tendon	30,00	strands/tendon=	180,00	strands
n2	6	Tendon	30,00	strands/tendon=	180,00	strands
n3	6	Tendon	30,00	strands/tendon=	180,00	strands
n _t =	18			n _s =	540,00	

a. Persentase tegangan leleh pada baja (*Jacking force*)

$$\begin{aligned}
 P_o &= P_t / (0,85 \times n_s \times P_{bs}) \\
 &= 64551,86 / (0,85 \times 540,00 \times 188,4317) \\
 &= 64551,86 / 86490,1530 \\
 &= 0,7463 \\
 &= 74,63 \% < 80\% \text{ (OK)}
 \end{aligned}$$

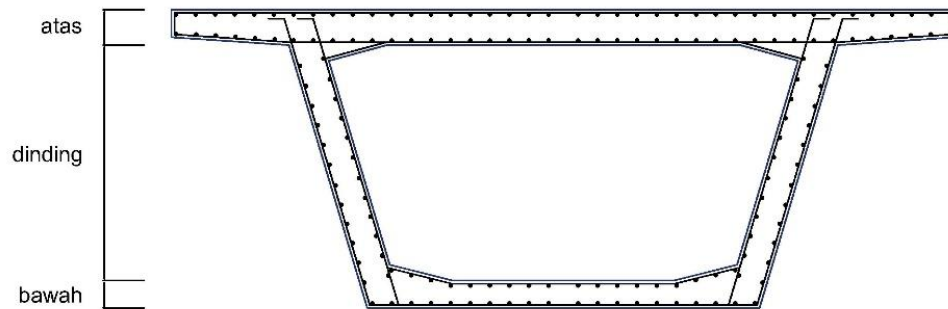
b. Gaya prategang yang terjadi akibat *jacking*

$$\begin{aligned}
 P_j &= P_o \times n_s \times P_{bs} \\
 &= 74,63 \% \times 540,00 \times 188,4317 \\
 &= 74,63 \% \times 101753,118 \\
 &= 75943,37 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Diperkirakan *loss of prestress* sebesar 25%, sehingga besaran gaya prategang akhir setelah memperhitungkan kehilangan tegangan (gaya prategang efektif) didapatkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P_{eff} &= 75\% \times P_j \\
 &= 75\% \times 75943,37 \\
 &= 56957,53 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

4.6.3. Pembesian Box Girder



Gambar 4.16. Pembesian *box girder*

a. Tulangan plat atas

Rencana tulangan yang digunakan untuk plat atas adalah D 19.

$$\begin{aligned}
 A_{ST} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 361 \\
 &= 283,3850 \text{ mm}^2 \\
 &= 0,00028 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Luas tampang bagian atas,

$$A_{C \text{ atas}} = 3,3600 \text{ m}^2$$

Luas tulangan bagian atas,

$$\begin{aligned}
 A_{ST \text{ atas}} &= 0,5\% \times A_{C \text{ atas}} \\
 &= 0,5\% \times 3,3600 \\
 &= 0,0168
 \end{aligned}$$

Jumlah tulangan,

$$\begin{aligned}
 n_s &= \frac{A_{ST \text{ atas}}}{A_{ST}} \\
 &= \frac{0,0168}{0,00028} \\
 &= 60 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

Untuk tulangan plat bagian atas digunakan 60 D 19.

b. Tulangan plat dinding

Rencana tulangan yang digunakan untuk plat dinding adalah D19.

$$\begin{aligned}A_{ST} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\&= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2 \\&= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 361 \\&= 283,3850 \text{ mm}^2 \\&= 0,00028 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Luas tampang bagian dinding,

$$A_{C \text{ dinding}} = 3,0200 \text{ m}^2$$

Luas tulangan bagian dinding,

$$\begin{aligned}A_{ST \text{ dinding}} &= 0,5\% \times A_{C \text{ dinding}} \\&= 0,5\% \times 3,0200 \\&= 0,0151\end{aligned}$$

Jumlah tulangan,

$$\begin{aligned}ns &= \frac{A_{ST \text{ atas}}}{A_{ST}} \\&= \frac{0,0151}{0,00028} \\&= 53,9286 \text{ buah}\end{aligned}$$

Untuk tulangan plat bagian dinding digunakan 54 D 19.

c. Tulangan plat bawah

Rencana tulangan yang digunakan untuk plat bawah adalah D19.

$$\begin{aligned}A_{ST} &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\&= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 19^2 \\&= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 361 \\&= 283,3850 \text{ mm}^2 \\&= 0,00028 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Luas tampang bagian bawah,

$$A_{C \text{ bawah}} = 1,8725 \text{ m}^2$$

Luas tulangan bagian bawah,

$$\begin{aligned} A_{ST \text{ bawah}} &= 0,5\% \times A_{C \text{ bawah}} \\ &= 0,5\% \times 1,8725 \\ &= 0,0094 \end{aligned}$$

Jumlah tulangan,

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{A_{ST \text{ atas}}}{A_{ST}} \\ &= \frac{0,0094}{0,00028} \\ &= 33,4375 \text{ buah} \end{aligned}$$

Untuk tulangan plat bagian bawah digunakan 34 D 19.

4.6.4. Posisi Tendon

Pengaturan tata letak tendon bertujuan agar tendon agar berada di posisi yang aman. Perhitungan tata letak tendon bermaksud agar memiliki peninjauan letak tendon pada tiap jarak tertentu untuk suatu bentang balok yang direncanakan. Perhitungan posisi tendon dilakukan dengan meninjau pada dua posisi, yaitu di tengah bentang dan tumpuan.

a. Posisi tendon pada tengah bentang

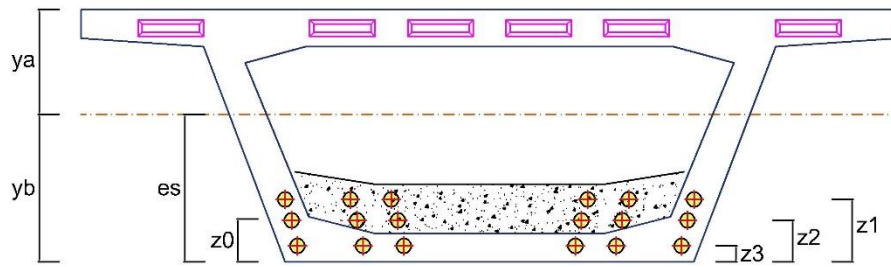
Jarak pusat tendon baris ketiga dengan alas balok; $a = 0,25 \text{ m}$

Jarak titik berat tendon terhadap alas balok,

$$\begin{aligned} z_0 &= y_b - e_s \\ &= 2,1745 - 1,8750 \\ &= 0,30 \text{ m} \end{aligned}$$

Jarak antar as tendon tiap baris,

$$y_d = 0,150 \text{ m}$$



Gambar 4.17. Posisi tendon di tengah bentang

Jarak tendon terhadap alas, sebagai berikut :

Jarak tendon baris pertama,

$$\begin{aligned} z_1 &= a + 2 y_d \\ &= 0,25 + 2(0,15) \\ &= 0,25 + 0,30 \\ &= 0,55 \text{ m} \end{aligned}$$

Jarak tendon baris kedua,

$$\begin{aligned} z_2 &= a + y_d \\ &= 0,25 + 0,15 \\ &= 0,40 \text{ m} \end{aligned}$$

Jarak tendon baris ketiga,

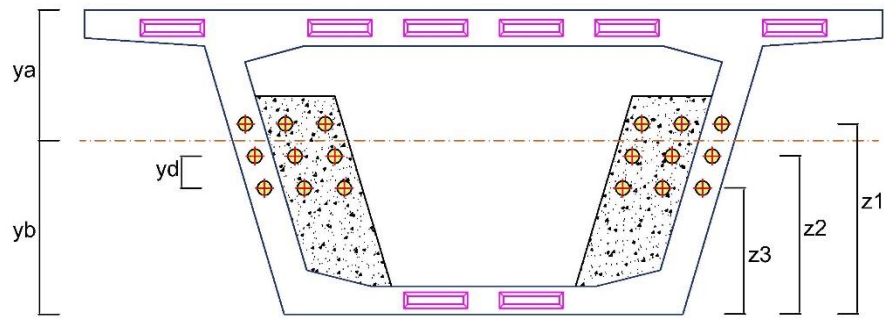
$$\begin{aligned} z_3 &= a \\ &= 0,25 \text{ m} \end{aligned}$$

b. Posisi tendon di tumpuan

Jarak pusat tendon tiap baris; $y_d' = 0,40 \text{ m}$

Jarak tendon baris ketiga terhadap alas balok,

$$\begin{aligned} a' &= y_b - 1,50 y_d' \\ &= 2,1745 - (1,50 \times 0,40) \\ &= 2,1745 - (0,60) \\ &= 1,5745 \text{ m} \end{aligned}$$



Gambar 4.18. Posisi tendon di tumpuan

Jarak tendon terhadap alas, sebagai berikut :

Jarak tendon baris pertama,

$$\begin{aligned}
 z_1' &= a' + 2 yd' \\
 &= 1,5745 + 2(0,40) \\
 &= 1,5745 + 0,80 \\
 &= 2,3745 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jarak tendon baris kedua,

$$\begin{aligned}
 z_2' &= a' + yd' \\
 &= 1,5745 + 0,40 \\
 &= 1,9745 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jarak tendon baris ketiga,

$$\begin{aligned}
 z_3' &= a' \\
 &= 1,5745 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Berikut adalah rekap hasil perhitungan posisi tendon di tengah bentang dan di tumpuan, yang terdiri dari 3 baris tendon dalam satu penampang *box girder*.

Tabel 4.21. Posisi tendon di tengah bentang dan tumpuan

Nomor tendon	Posisi tendon di tumpuan ($x = 0,00$ m)	z_i' (m)	Nomor tendon	Posisi tendon di tengah bentang ($x = 40,00$ m)	z_i (m)	$f_i = z_i' - z_i$
1	$z_1' = a + 2 yd'$	2,3745	1	$z_1 = a + 2 yd$	0,5500	1,8245
2	$z_2' = a + yd'$	1,9745	2	$z_2 = a + yd$	0,4000	1,5745
3	$z_3' = a$	1,5745	3	$z_3 = a$	0,2500	1,3245

4.6.5. Lintasan Inti Tendon

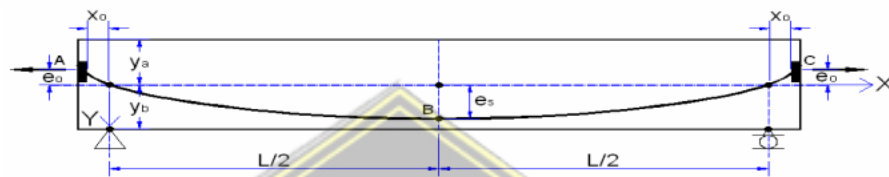
Persamaan lintasan tendon,

$$Y = 4 \times f \times X/L^2 \times (L-X)$$

$$L = 80,0000 \text{ m}$$

$$f = e_s = 1,8745 \text{ m}$$

Berikut adalah contoh gambar lintasan inti tendon pada suatu balok prategang (lihat Gambar 4.19).



Gambar 4.19. Lintasan inti tendon

Contoh perhitungan lintasan inti tendon pada jarak $x = 40,0000 \text{ m}$ adalah sebagai berikut :

$$Y = 4 \times f \times X/L^2 \times (L-X)$$

$$= 4 \times 1,8745 \times 40/80^2 \times (80-40)$$

$$= 1,8745 \text{ m}$$

Untuk lintasan inti tendon tiap jarak 4 m, dirangkum pada Tabel berikut ini.

Tabel 4.22. Lintasan inti tendon

X	Y	X	Y
-0,3000	-0,0282	44,0000	1,8558
0,0000	0,0000	48,0000	1,7996
4,0000	0,3562	52,0000	1,7058
8,0000	0,6748	56,0000	1,5746
12,0000	0,9560	60,0000	1,4059
16,0000	1,1997	64,0000	1,1997
20,0000	1,4059	68,0000	0,9560
24,0000	1,5746	72,0000	0,6748

X	Y	X	Y
28,0000	1,7058	76,0000	0,3562
32,0000	1,7996	80,0000	0,0000
36,0000	1,8558	0,3000	0,0280
40,0000	1,8745		

$x_o =$	0,3000	$L/2 + x_o =$	40,3000
$e_o =$	0,0282	$e_s + e_o =$	1,9027

$$\begin{aligned}
 \alpha_{AB} &= 2 (e_s + e_o) / (L/2 + x_o) \\
 &= 2 (1,8745 + 0,0282) / (80/2 + 0,3000) \\
 &= 2 (1,9027) / (40,3000) \\
 &= 0,0944
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{BC} &= 2 (e_s + e_o) / (L/2 + x_o) \\
 &= 2 (1,8745 + 0,0282) / (80/2 + 0,3000) \\
 &= 2 (1,9027) / (40,3000) \\
 &= 0,0944
 \end{aligned}$$

4.6.6. Sudut Angkur

Rumus lintasan tendon :

$$\begin{aligned}
 Y &= 4 \times f_i \times \frac{X}{L^2} (L-X) \\
 \frac{dY}{dX} &= 4 \times f_i \times \frac{(L-2X)}{L}
 \end{aligned}$$

Untuk posisi angkur di tumpuan $x = 0$, maka diperoleh persamaan pada tendon baris pertama sebagai berikut :

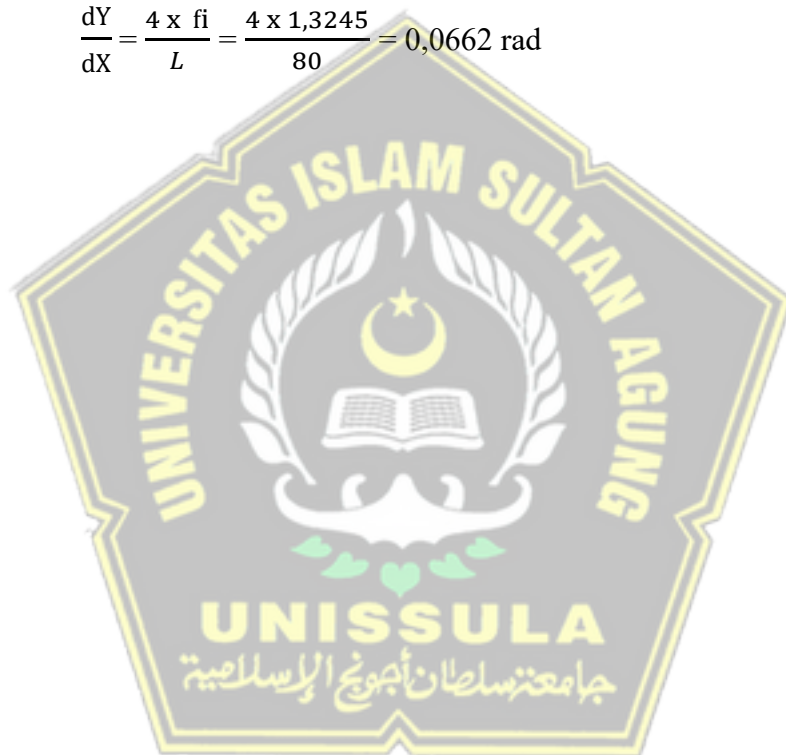
$$\frac{dY}{dX} = \frac{4 \times f_i}{L} = \frac{4 \times 1,8245}{80} = 0,0912 \text{ rad}$$

Untuk posisi angkur di tumpuan $x = 0$, maka diperoleh persamaan pada tendon baris kedua sebagai berikut :

$$\frac{dY}{dX} = \frac{4 \times f_i}{L} = \frac{4 \times 1,5745}{80} = 0,0787 \text{ rad}$$

Untuk posisi angkur di tumpuan $x = 0$, maka diperoleh persamaan pada tendon baris ketiga sebagai berikut :

$$\frac{dY}{dX} = \frac{4 \times f_i}{L} = \frac{4 \times 1,3245}{80} = 0,0662 \text{ rad}$$



Persamaan untuk menentukan sudut angkur adalah $\alpha = \text{ATAN}(dY/dX)$, sehingga diperoleh besaran sudut angkur tiap baris sebagai berikut :

Tabel 4.23. Sudut angkur

Nomor tendon	Jumlah strands	Diameter selubung	f_i	dY/dX	Sudut Angkur			
1	180,0000	102	1,8245	0,0912	$\alpha_1 =$	0,0910 rad	=	5,2124°
2	180,0000	102	1,5745	0,0787	$\alpha_2 =$	0,0786 rad	=	4,5013°
3	180,0000	102	1,3245	0,0662	$\alpha_3 =$	0,0661 rad	=	3,7889°

4.6.7. Tata Letak dan Trace Kabel

L =	80,0000 m
y _b =	2,1745 m
f ₀ = e _s =	1,8745 m

f ₁ =	1,8245 m
f ₂ =	1,5745 m
f ₃ =	1,3245 m

Persamaan masing-masing kabel :

$$z_i = z_i' - 4 \times f_i \times X / L^2 \times (L-X)$$

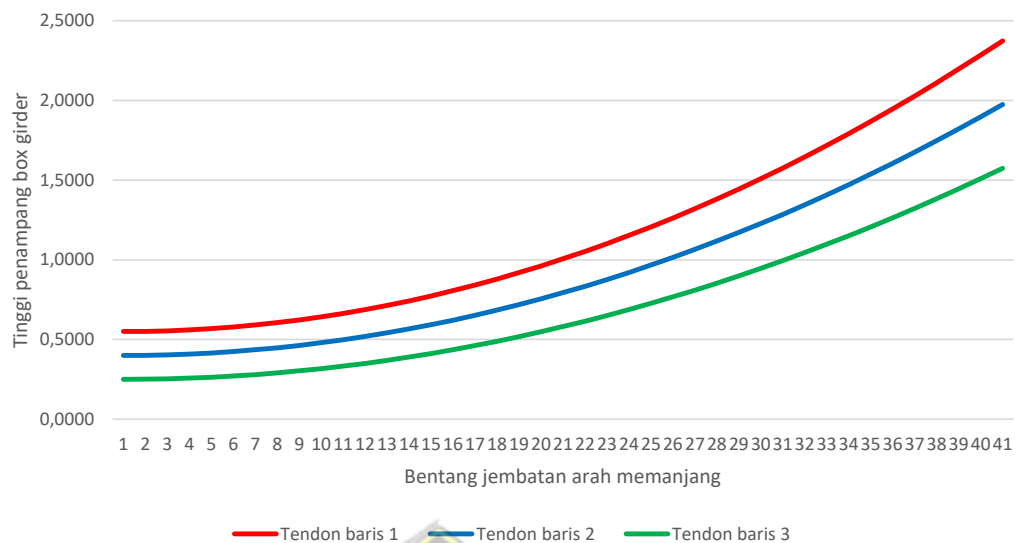
Mengacu persamaan diatas, maka dapat diketahui tata letak kabel pada jarak yang diinginkan. Perhitungan tata letak kabel meninjau pada bentang 0-40 meter dan 40-80 meter. Tata letak kabel tiap 1 meter disajikan pada Tabel berikut ini.

a. Tata letak dan trace kabel pada bentang 0 - 40 m

Tabel 4.24. Tata letak dan trace kabel pada bentang 0 - 40 m

Jarak	Trace	Tata letak kabel		
x	z ₀	z ₁	z ₂	z ₃
0	0,3000	0,5500	0,4000	0,2500
1	0,3012	0,5511	0,4010	0,2508
2	0,3047	0,5546	0,4039	0,2533
3	0,3105	0,5603	0,4089	0,2575
4	0,3187	0,5682	0,4157	0,2632
5	0,3293	0,5785	0,4246	0,2707
6	0,3422	0,5911	0,4354	0,2798
7	0,3574	0,6059	0,4482	0,2906
8	0,3750	0,6230	0,4630	0,3030
9	0,3949	0,6424	0,4797	0,3171
10	0,4172	0,6640	0,4984	0,3328
11	0,4418	0,6880	0,5191	0,3502
12	0,4687	0,7142	0,5417	0,3692
13	0,4980	0,7427	0,5663	0,3899
14	0,5296	0,7735	0,5929	0,4123
15	0,5636	0,8066	0,6214	0,4363

Jarak	Trace	Tata letak kabel		
x	z ₀	z ₁	z ₂	z ₃
16	0,5999	0,8419	0,6519	0,4619
17	0,6386	0,8796	0,6844	0,4892
18	0,6796	0,9195	0,7188	0,5182
19	0,7229	0,9617	0,7552	0,5488
20	0,7686	1,0061	0,7936	0,5811
21	0,8167	1,0529	0,8340	0,6151
22	0,8670	1,1019	0,8763	0,6507
23	0,9198	1,1532	0,9206	0,6879
24	0,9748	1,2068	0,9668	0,7268
25	1,0322	1,2627	1,0150	0,7674
26	1,0920	1,3209	1,0652	0,8096
27	1,1541	1,3813	1,1174	0,8535
28	1,2185	1,4440	1,1715	0,8990
29	1,2853	1,5090	1,2276	0,9462
30	1,3544	1,5763	1,2857	0,9950
31	1,4259	1,6458	1,3457	1,0455
32	1,4997	1,7177	1,4077	1,0977
33	1,5759	1,7918	1,4716	1,1515
34	1,6544	1,8682	1,5376	1,2070
35	1,7352	1,9469	1,6055	1,2641
36	1,8184	2,0278	1,6753	1,3228
37	1,9039	2,1111	1,7472	1,3833
38	1,9918	2,1966	1,8210	1,4454
39	2,0820	2,2844	1,8968	1,5091
40	2,1745	2,3745	1,9745	1,5745



Gambar 4.20. Tata letak tendon pada bentang 0-40 m

Gambar 4.20 menunjukkan tata letak tendon dari sisi memanjang pada bentang jembatan 0-40 m. Tata letak tendon diatas sesuai dengan prinsip beton prategang, dimana perletakkan baja mutu tinggi sebagai pra-penegangan berada di daerah tarik penampang beton. Daerah tarik – tekan pada seluruh bentang jembatan dapat diketahui dari hasil perhitungan momen (Tabel 4.15). Tata letak tendon diatur sedemikian rupa bertujuan untuk mengurangi atau mencegah terjadinya keretakan.

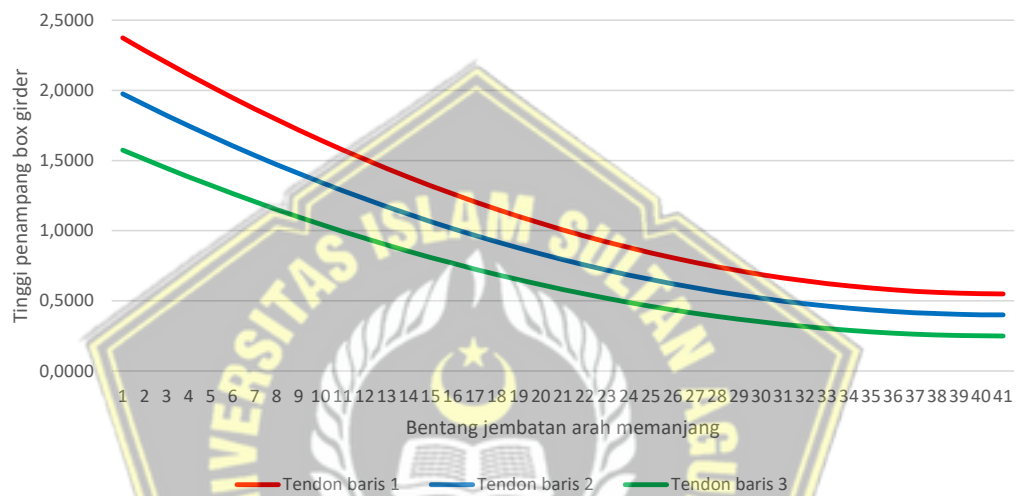
b. Tata letak dan trace kabel pada bentang 40 - 80 m

Tabel 4.25. Tata letak dan trace kabel pada bentang 40 - 80 m

Jarak	Trace	Tata letak kabel		
x	z_0	z_1	z_2	z_3
0	2,1745	2,3745	1,9745	1,5745
1	2,0820	2,2844	1,8968	1,5091
2	1,9918	2,1966	1,8210	1,4454
3	1,9039	2,1111	1,7472	1,3833
4	1,8184	2,0278	1,6753	1,3228
5	1,7352	1,9469	1,6055	1,2641
6	1,6544	1,8682	1,5376	1,2070
7	1,5759	1,7918	1,4716	1,1515

Jarak	Trace	Tata letak kabel		
x	z ₀	z ₁	x	z ₀
8	1,4997	1,7177	1,4077	1,0977
9	1,4259	1,6458	1,3457	1,0455
10	1,3544	1,5763	1,2857	0,9950
11	1,2853	1,5090	1,2276	0,9462
12	1,2185	1,4440	1,1715	0,8990
13	1,1541	1,3813	1,1174	0,8535
14	1,0920	1,3209	1,0652	0,8096
15	1,0322	1,2627	1,0150	0,7674
16	0,9748	1,2068	0,9668	0,7268
17	0,9198	1,1532	0,9206	0,6879
18	0,8670	1,1019	0,8763	0,6507
19	0,8167	1,0529	0,8340	0,6151
20	0,7686	1,0061	0,7936	0,5811
21	0,7229	0,9617	0,7552	0,5488
22	0,6796	0,9195	0,7188	0,5182
23	0,6386	0,8796	0,6844	0,4892
24	0,5999	0,8419	0,6519	0,4619
25	0,5636	0,8066	0,6214	0,4363
26	0,5296	0,7735	0,5929	0,4123
27	0,4980	0,7427	0,5663	0,3899
28	0,4687	0,7142	0,5417	0,3692
29	0,4418	0,6880	0,5191	0,3502
30	0,4172	0,6640	0,4984	0,3328
31	0,3949	0,6424	0,4797	0,3171
32	0,3750	0,6230	0,4630	0,3030
33	0,3574	0,6059	0,4482	0,2906
34	0,3422	0,5911	0,4354	0,2798
35	0,3293	0,5785	0,4246	0,2707
36	0,3187	0,5682	0,4157	0,2632

Jarak	Trace	Tata letak kabel		
x	z ₀	z ₁	x	z ₀
37	0,3105	0,5603	0,4089	0,2575
38	0,3047	0,5546	0,4039	0,2533
39	0,3012	0,5511	0,4010	0,2508
40	0,3000	0,5500	0,4000	0,2500



Gambar 4.21. Tata letak tendon pada bentang 40 - 80 m

Gambar 4.21 menunjukkan tata letak tendon dari sisi memanjang pada bentang jembatan 40 - 80 m. Tata letak tendon diatas sesuai dengan prinsip beton prategang, dimana perletakkan baja mutu tinggi sebagai pra-penegangan berada di daerah tarik penampang beton. Daerah tarik – tekan pada seluruh bentang jembatan dapat diketahui dari hasil perhitungan momen (Tabel 4.15). Tata letak tendon diatur sedemikian rupa bertujuan untuk mengurangi atau mencegah terjadinya keretakan.

4.6.8. *Loss of Prestress (Kehilangan tegangan)*

Proses transfer atau pemberian gaya prategang akan menghadirkan berbagai perilaku yang terjadi antara beton dan baja prategang. Perilaku-perilaku antara beton dan baja prategang inilah yang akan mengakibatkan kehilangan gaya prategang. Hilangnya atau berkurangnya gaya prategang pada tendon diakibatkan oleh beberapa faktor.

Kehilangan tegangan terbagi atas dua bagian besar, tergantung dari waktu terjadinya. Keduanya adalah kehilangan jangka pendek (*immediate losses of prestress*) dan kehilangan jangka panjang (*long term losses of prestress*). Kehilangan tegangan jangka pendek terjadi pada saat transfer atau setelah proses penarikan tendon. Penyebab kehilangan tegangan jangka pendek antara lain akibat dari gesekan angkur, akibat dari gesekan kabel, serta akibat dari pemendekan elastis. Sedangkan kehilangan tegangan jangka panjang terjadi pada saat *service* atau perlahan seiring pengaruh waktu (jangka waktu tertentu). Penyebab kehilangan tegangan jangka panjang antara lain akibat dari pengaruh rangkai dan pengaruh susut. Pada sub bab ini memperhitungkan beberapa faktor penyebab *loss of prestress*, diantaranya *anchorage friction*, *jack friction*, *elastic shortening*, *anchoring*, *shrinkage*, dan *creep*.

a. Kehilangan tegangan akibat *Anchorage friction*

Kehilangan tegangan efek gesekan angkur diakibatkan karena adanya pergeseran pada saat proses transfer gaya prategang. Besarnya kehilangan tegangan akibat dari gesekan angkur adalah 3% dari hasil perhitungan gaya prategang saat penarikan (*jacking*) dengan rumus sebagai berikut :

$$\begin{aligned} P_o &= 97\% \times P_j \dots\dots\dots(2.5) \\ &= 97\% \times 75943,3695 \\ &= 73665,0684 \text{ kN} \end{aligned}$$

b. Kehilangan tegangan akibat gesekan kabel (*Jack friction*)

Terjadi karena adanya gesekan disepanjang kabel saat proses pemberian gaya prategang, sehingga mengakibatkan pengurangan tegangan. *Loss of prestress* akibat *jack friction* dipengaruhi oleh perubahan besaran sudut lintasan tendon,

panjang kabel yang diukur, koefisien gesek dan koefisien wobble. Perhitungan kehilangan tegangan akibat gesekan kabel adalah sebagai berikut :

Lintasan tendon mengalami perubahan sudut dengan total,

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_{AB} + \alpha_{BC} \\ &= 0,094 + 0,094 \\ &= 0,189 \text{ rad}\end{aligned}$$

Untuk menentukan nilai koefisien gesek, diperoleh berdasarkan Tabel 2.5. Maka didapatkan nilai koefisien gesek, $\mu = 0,200$

Untuk menentukan nilai koefisien gesek, diperoleh berdasarkan Tabel 2.6. Maka didapatkan nilai koefisien wobble, $\beta = 0,012$

Perhitungan kehilangan tegangan akibat gesekan kabel sebagai berikut :

Untuk $L_x = 40,00 \text{ m}$:

$$\begin{aligned}P_x &= P_o \times e^{-\mu(\alpha + \beta \cdot L_x)} \dots\dots\dots(2.6) \\ &= 73665,0684 \times 2,7183^{-0,2(0,189 + 0,012 \cdot 40)} \\ &= 73665,0684 \times 2,7183^{-0,2(0,6690)} \\ &= 73665,0684 \times 2,7183^{-0,1338} \\ &= 64418,2435 \text{ kN}\end{aligned}$$

Untuk $L_x = 80,00 \text{ m}$:

$$\begin{aligned}P_x &= P_o \times e^{-\mu(\alpha + \beta \cdot L_x)} \dots\dots\dots(2.6) \\ &= 73665,0684 \times 2,7183^{-0,2(0,189 + 0,012 \cdot 80)} \\ &= 73665,0684 \times 2,7183^{-0,2(1,1490)} \\ &= 73665,0684 \times 2,7183^{-0,2298} \\ &= 58500,5922 \text{ kN}\end{aligned}$$

c. Kehilangan tegangan akibat pemendekan elastis (*elastic shortening*)

Ketika gaya prategang bekerja pada struktur, hal tersebut menyebabkan beton mengalami pemendekan. Posisi tendon yang melekat pada beton juga secara bersamaan atau serentak mengalami pemendekan. Oleh karena itu, tendon akan kehilangan gaya prategang. Perhitungan *loss of prestress* efek dari *elastic shortening* sebagai berikut :

Luas tampang tendon,

$$A_{st} = 98,71 \text{ mm}^2 \text{ (lihat Tabel 4.19.)}$$

$$\begin{aligned} A_t &= n_s \times A_{st} \\ &= 540,0000 \times 98,7095 \\ &= 53303,13 \text{ mm}^2 \\ &= 0,0533 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Rasio modulus bahan (baja dengan balok),

$$\begin{aligned} E_{sps} &= 1,9300 \times 10^5 \text{ MPa} \text{ (lihat Tabel 4.19.)} \\ f_c' &= 0,83 \times K \times 0,098 \\ &= 0,83 \times 500 \times 0,098 \\ &= 41,5 \text{ Mpa} \\ w_c &= 25,5 \text{ kN/m}^3 = 2550 \text{ kg/m}^3 \\ E_{cbalok} &= w_c^{1,5} \times 0,043 \times \sqrt{f_c'} \dots\dots\dots(2.1) \\ &= 2550^{1,5} \times 0,043 \times \sqrt{41,5} \\ &= 128768,688 \times 0,043 \times \sqrt{41,5} \\ &= 3,5670 \times 10^4 \text{ MPa} \\ n &= \frac{E_{sps}}{E_{cbalok}} \\ &= \frac{1,9300 \times 10^5}{3,5670 \times 10^4} \\ &= 5,4107 \end{aligned}$$

Penampang balok dengan jari-jari inersia sebagai berikut,

$$\begin{aligned} I_x &= 17,1575 \text{ m}^4 \\ i &= \sqrt{(I_x / A_c)} \\ &= \sqrt{(17,1575 / 8,2525)} \\ &= \sqrt{(2,0791)} \\ &= 1,4419 \text{ mm} \\ K_e &= A_t / A_c \times (1 + e_s^2 / i^2) \dots\dots\dots(2.7) \\ &= 0,0533 / 8,2525 \times (1 + 1,8745^2 / 1,4419^2) \\ &= 0,0533 / 8,2525 \times (1 + 3,5138 / 2,0791) \\ &= 0,0174 \end{aligned}$$

Tegangan tendon sebelum terjadinya *loss of prestress* (di tengah bentang),

$$P_{bs} = 188,4317 \text{ kN} \quad \text{(lihat Tabel 4.19.)}$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{pi} &= (n_s \times P_{bs}) / A_t \\
 &= (540 \times 188,4317) / 0,0533 \\
 &= (101753,1180) / 0,0533 \\
 &= 1,9090 \times 10^6 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Loss of prestress akibat regangan elastik akibat berat sendiri,

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_{pe}' &= \sigma_{pi} \times n \times K_e / (1 + n \times K_e) \dots\dots\dots(2.8) \\
 &= 1,9090 \times 10^6 \times 5,4107 \times 0,0174 / (1 + 5,4107 \times 0,0174) \\
 &= 1,9090 \times 10^6 \times 5,4107 \times 0,0174 / (1 + 0,0941) \\
 &= 164045,9755 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Besaran tegangan pada beton akibat pengaruh dari gaya prategang,

$$\begin{aligned}
 M_{balok} &= 74822,6844 \text{ kNm} \\
 e_s &= 1,8745 \text{ m} \\
 \sigma_{bt} &= (\Delta\sigma_{pe}' / n) - (M_{balok} \times e_s / I_x) \\
 &= (164045,9755 / 5,4107) - (74822,6844 \times 1,8745 / 17,1575) \\
 &= (30318,8082) - (140255,1219 / 17,1575) \\
 &= 22144,0246 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Loss of prestress oleh regangan elastik tanpa pengaruh berat sendiri,

$$\begin{aligned}
 \Delta\sigma_{pe} &= \frac{1}{2} \times n \times \sigma_{bt} \dots\dots\dots(2.9) \\
 &= \frac{1}{2} \times 5,4107 \times 22144,0246 \\
 &= 59907,4858 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

Loss of prestress efek dari pemendekan elastis,

$$\begin{aligned}
 \Delta P_e &= \Delta\sigma_{pe} \times A_t \dots\dots\dots(2.10) \\
 &= 59907,4858 \times 0,0533 \\
 &= 3193,2559 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

d. Kehilangan tegangan akibat pengangkuran (*anchoring*)

Kehilangan tegangan akibat pengangkuran terjadi akibat slip atau posisi angkur yang tidak tepat ketika transfer tegangan. Perhitungan *loss of prestress* akibat pengangkuran adalah sebagai berikut :

Kemiringan diagram gaya,

$$\begin{aligned}
 P_o &= 73665,0684 \text{ kN} \\
 P_x &= 64418,2435 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 m &= \tan \omega = (P_o - P_x) / L_x \\
 &= (73665,0684 - 64418,2435) / 40 \\
 &= (9246,8249) / 40 \\
 &= 230,3070 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\Delta L = 0,0020 \text{ m (jarak kritis slip angkur diambil antara 2-7 mm)}$$

$$E_{sps} = 1,93 \times 10^5 \text{ MPa (lihat Tabel 4.19.)}$$

$$\begin{aligned}
 L_{max} &= \sqrt{(\Delta L \times E_{sps} \times A_t / m)} \dots \dots \dots (2.11) \\
 &= \sqrt{(0,0020 \times 1,93 \times 10^5 \times 0,0533 / 230,3070)} \\
 &= 0,2989 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kehilangan gaya prategang akibat pengankuran,

$$\begin{aligned}
 \Delta P &= 2 \times L_{max} \times \tan \omega \dots \dots \dots (2.12) \\
 &= 2 \times 0,2989 \times 230,3070 \\
 &= 137,6745 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P'_{max} &= P_o - \Delta P / 2 \dots \dots \dots (2.13) \\
 &= 73665,0684 - 137,6745 / 2 \\
 &= 73665,0684 - 68,8373 \\
 &= 73596,2311 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{max} &= P'_{max} - \Delta P \dots \dots \dots (2.14) \\
 &= 73596,2311 - 137,6745 \\
 &= 73458,5566 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

e. Pengaruh susut (*shrinkage*)

Pengaruh susut terjadi akibat adanya proses kimiawi dimana berkurangnya air di dalam beton.

Untuk menentukan nilai *basic shrinkage strain* (ϵ_b), diperoleh berdasarkan Tabel 2.7. Pada kondisi kering udara dengan kelembaban <50%, maka didapatkan nilai :

$$\epsilon_b = 0,0006$$

Untuk menentukan nilai k_b , diperoleh berdasarkan Gambar 2.11. Koefisien yang tergantung pada pemakaian air semen/ *water cement ratio* (k_b) untuk beton mutu

tinggi dengan factor air semen, $w = 0,40$ *cement content* = 4,5 kN/m³ diperoleh :

$$k_b = 0,9050$$

Untuk menentukan nilai k_e , diperoleh berdasarkan Gambar 2.12. Koefisien tergantung pada tebal teoritis (e_m) :

$$\text{Luas penampang balok, } A_c = 8,2525 \text{ m}^2$$

$$\text{Jumlah sisi atau keliling penampang balok yang terkena udara eksternal, } K = 20,5548 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} e_m &= 2 \times A_c / K \\ &= 2 \times 8252500 / 20554,80 \\ &= 2 \times 401,4877 \\ &= 803,0500 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\text{Didapatkan, } k_e = 0,5$$

$$\begin{aligned} k_p &= 100 / (100 + 20 \times \rho) \\ &= 100 / (100 + 20 \times 6,5\%) \\ &= 100 / (100 + 1,3000) \\ &= 0,9871 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta_{su} &= \epsilon_b \times k_b \times k_e \times k_p \dots \dots \dots (2.15) \\ &= 0,0006 \times 0,9050 \times 0,5 \times 0,9871 \\ &= 0,0003934 \end{aligned}$$

Tegangan susut,

$$\begin{aligned} \sigma_{sh} &= \Delta_{su} \times E_{sps} \\ &= 0,0003934 \times 1,930 \times 10^5 \\ &= 75,9333 \text{ MPa} \end{aligned}$$

f. Pengaruh rangkak (*creep*)

Beban yang terus bekerja mengakibatkan beton mengalami rangkak dan mengakibatkan kehilangan tegangan pada tendon. Perhitungan kehilangan tegangan pengaruh rangkak adalah sebagai berikut :

$P_{initial}$ (keadaan saat transfer) di tengah bentang,

$$\begin{aligned}
 P_i &= P_x - \Delta P_e \\
 &= 64418,2435 - 3193,2559 \\
 &= 61224,9876 \text{ kN} \\
 P_i / (n_s \times P_{bs}) &= 61224,9876 / (540 \times 188,4317) \\
 &= 61224,9876 / (101753,118) \\
 &= 60,17\% \text{ UTS}
 \end{aligned}$$

Regangan pengaruh *creep*,

$$\begin{aligned}
 \epsilon_{cr} &= (f_c / E_{c\text{balok}}) \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_{tm} \dots \dots \dots (2.16) \\
 &= (41500 / 3,567 \times 10^5) \times 0,9050 \times 3,0000 \times 0,9380 \times 0,5 \times 0,2000 \\
 &= 0,04350
 \end{aligned}$$

Tegangan pengaruh *creep*,

$$\begin{aligned}
 \sigma_{cr} &= \epsilon_{cr} \times E_{sps} \\
 &= 0,04350 \times 1,930 \times 10^5 \\
 &= 8394,6261 \text{ kPa} \\
 \Delta \sigma_{sc} &= \sigma_{cr} \times \sigma_{sh} \\
 &= 8394,6261 \times 75,9333 \\
 &= 8470,5595 \text{ kPa} \\
 \sigma_{pi} &= P_i \times A_t \\
 &= 61224,9876 \times 0,0533 \\
 &= 1,1486 \times 10^6 \text{ kPa}
 \end{aligned}$$

g. *Loss of prestress* total

Loss of prestress untuk jangka panjang,

$$\begin{aligned}
 \sigma_r &= X \times c \times (\sigma_{pi} - \Delta \sigma_{sc}) \\
 &= 0 \times 8,50\% (1,1486 \times 10^6 - 8470,5595) \\
 &= 0 \text{ kPa} \\
 \Delta \sigma_{sc} + \sigma_r &= 8470,5595 + 0 = 8470,5595 \text{ kPa} \\
 \Delta P &= (\Delta \sigma_{sc} + \sigma_r) \times A_t \\
 &= 8470,5595 \times 0,0533 \\
 &= 451,5072 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Gaya efektif (P_{eff}) di tengah bentang,

$$\begin{aligned}P_{eff} &= P_i - \Delta P \\&= 61224,9876 - 451,5072 \\&= 60773,4804 \text{ kN}\end{aligned}$$

Total kehilangan gaya prategang diperoleh,

$$\begin{aligned}(1 - P_{eff}/P_j) \times 100\% &= (1 - 60773,4804/75943,3695) \times 100\% \\&= (1 - 0,8002) \times 100\% \\&= 19,9753\%\end{aligned}$$

Setelah transfer gaya prategang dan diketahui besaran kehilangan gaya prategang, dilakukan kontrol tegangan pada tendon baja pasca tarik segera setelah penyaluran gaya prategang :

Tegangan maksimum yang diijinkan untuk terjadi pada tendon,

$$\begin{aligned}f_{p \text{ ijin}} &= 0,70 \times f_{pu} \\&= 0,70 \times 1860,00 \\&= 1302,00 \text{ MPa} \\&= 1302000 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Terjadinya tegangan sebesar,

$$\begin{aligned}f_p &= P_{eff} / A_t \\&= 60773,4804 / 0,0533 \\&= 1140148,6686 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Syarat:

$$\begin{array}{ccc}f_{p \text{ ijin}} & \geq & f_p \\1302000 & > & 1140148,6686\end{array}$$

maka, *AMAN*

4.6.9. Tegangan Akibat Gaya Prategang

Menurut Peraturan perencanaan Teknik Jembatan, tegangan beton sesaat setelah penyaluran gaya prategang (sebelum terjadi kehilangan tegangan sebagai fungsi waktu) tidak boleh melampaui nilai berikut :

1. Tegangan serat tekan terluar (f_{ci1}) $\leq 0,6 f_{ci}$
2. Tegangan serat tarik terluar harus (f_{ti1}) $\leq 0,25 \sqrt{f_{ci}}$

Tegangan beton pada kondisi beban layan (setelah memperhitungkan semua kehilangan tegangan) tidak boleh melampaui nilai berikut :

1. Tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, beban mati dan beban hidup (f_{ci2}) $\leq 0,45 f_c$
2. Tegangan serat tarik terluar yang pada awalnya mengalami tekan (f_{ti1}) $\leq 0,5\sqrt{f_c}$

a. Keadaan awal

$$\begin{aligned}\text{Kuat tekan beton, } f_c &= 0,83 \times K \times 100 \\ &= 0,83 \times 500 \times 100 \\ &= 41500,00 \text{ kPa} \\ f_{ci} &= 0,8 \times f_c \\ &= 0,8 \times 41500,00 \\ &= 33200,00 \text{ kPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan tekan yang diijinkan pada beton, } f_{ci1} &= 0,6 f_{ci} \\ &= 0,6 \times 33200,00 \\ &= 19920,00 \text{ kPa} \\ \text{Tegangan tarik yang diijinkan pada beton, } f_{ti1} &= 0,25\sqrt{f_c} \\ &= 0,25\sqrt{33200,00} \\ &= 4609,56 \text{ kPa}\end{aligned}$$

Ketegangan serat atas pada beton,

$$\begin{aligned}f_a &= -P_t/A_c + P_t \times e_s / W_a - M_{\text{balok}} / W_a \\ &= -64551,8640/8,2525 + 64551,8640 \times 1,8745 / 10,5554 - \\ &\quad 74822,6844 / 10,5554 \\ &= -7822,0980 + 121002,4691 / 10,5554 - 7088,5693 \\ &= -3446,9175 \text{ kPa} < f_{ti1} \quad \text{maka, AMAN}\end{aligned}$$

Ketegangan serat bawah pada beton,

$$\begin{aligned}f_b &= -P_t/A_c - P_t \times e_s / W_b + M_{\text{balok}} / W_b \\ &= -64551,8640/8,2525 - 64551,8640 \times 1,8745 / 7,8902 + \\ &\quad 74822,6844 / 7,8902 \\ &= -7822,0980 - 121002,4691 / 7,8902 + 9482,9896 \\ &= -13675,1692 \text{ kPa} < f_{ci1} \quad \text{maka, AMAN}\end{aligned}$$

b. Keadaan setelah kehilangan gaya prategang

$$\begin{aligned}\text{Kuat tekan beton, } f_c' &= 0,83 \times K \times 100 \\ &= 0,83 \times 500 \times 100 \\ &= 41500,00 \text{ kPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan ijin tekan beton, } f_{ci2} &= 0,45 f_c' \\ &= 0,45 \times 41500,00 \\ &= 18675,00 \text{ kPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Tegangan ijin tarik beton, } f_{ti2} &= 0,5\sqrt{f_c'} \\ &= 0,5\sqrt{41500,00} \\ &= 3543,13 \text{ kPa}\end{aligned}$$

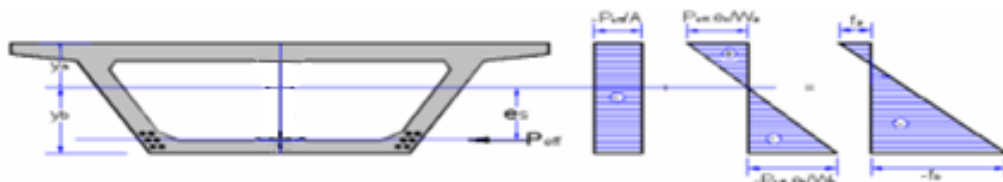
Ketegangan serat atas pada beton,

$$\begin{aligned}f_a &= -P_{eff}/A_c + P_{eff} \times e_s / W_a - M_{balok} / W_a \\ &= -60773,4804/8,2525 + 60773,4804 \times 1,8745/ 10,5554 - \\ &\quad 74822,6844/ 10,5554 \\ &= -7364,2509 + 113919,8890/ 10,5554 - 7088,5693 \\ &= -3660,0714 \text{ kPa} < f_{ti2} \quad \text{maka, AMAN}\end{aligned}$$

Ketegangan serat bawah pada beton,

$$\begin{aligned}f_b &= -P_{eff}/A_c - P_{eff} \times e_s / W_b + M_{balok} / W_b \\ &= -60773,4804/8,2525 - 60773,4804 \times 1,8745/ 7,8902 + \\ &\quad 74822,6844/ 7,8902 \\ &= -7364,2509 - 113919,8890/ 7,8902 + 9482,9896 \\ &= -12319,6638 \text{ kPa} < f_{ci2} \quad \text{maka, AMAN}\end{aligned}$$

4.6.10. Tegangan pada Balok akibat Beban Kombinasi



Gambar 4.22. Tegangan pada balok

a. Kontrol tegangan terhadap kombinasi 1

Ketegangan serat atas pada beton,

$$\begin{aligned} f_a &= -P_{eff}/A_{ck} + P_{eff} \times e_s/W'_{ac} - M_{komb.1}/W'_{ac} \\ &= -60773,4804/8,2525 + 60773,4804 \times 1,8745/6,4474 - \\ &\quad 197311,6923/6,4474 \\ &= -12885,3904 \text{ kPa} < f_{ci2} \quad \text{maka, AMAN} \end{aligned}$$

Ketegangan serat bawah pada beton,

$$\begin{aligned} f_b &= -P_{eff}/A_{ck} - P_{eff} \times e_s/W_{bc} + M_{komb.1}/W_{bc} \\ &= -60773,4804/8,2525 - 60773,4804 \times 1,8745/5,3607 + \\ &\quad 197311,6923/5,3607 \\ &= -1477,9025 \text{ kPa} < f_{ti2} \quad \text{maka, AMAN} \end{aligned}$$

b. Kontrol tegangan terhadap kombinasi 2

Ketegangan serat atas pada beton,

$$\begin{aligned} f_a &= -P_{eff}/A_{ck} + P_{eff} \times e_s/W'_{ac} - M_{komb.2}/W'_{ac} \\ &= -60773,4804/8,2525 + 60773,4804 \times 1,8745/6,4474 - \\ &\quad 197555,0423/6,4474 \\ &= -12923,1344 \text{ kPa} < f_{ci2} \quad \text{maka, AMAN} \end{aligned}$$

Ketegangan serat bawah pada beton,

$$\begin{aligned} f_b &= -P_{eff}/A_{ck} - P_{eff} \times e_s/W_{bc} + M_{komb.2}/W_{bc} \\ &= -60773,4804/8,2525 - 60773,4804 \times 1,8745/5,3607 + \\ &\quad 197555,0423/5,3607 \\ &= -1432,5071 \text{ kPa} < f_{ti2} \quad \text{maka, AMAN} \end{aligned}$$

c. Kontrol tegangan terhadap kombinasi 3

Ketegangan serat atas pada beton,

$$\begin{aligned} f_a &= -P_{eff}/A_{ck} + P_{eff} \times e_s/W'_{ac} - M_{komb.3}/W'_{ac} \\ &= -60773,4804/8,2525 + 60773,4804 \times 1,8745/6,4474 - \\ &\quad 199193,2923/6,4474 \\ &= -13177,2300 \text{ kPa} < f_{ci2} \quad \text{maka, AMAN} \end{aligned}$$

Ketegangan serat bawah pada beton,

$$\begin{aligned}
 f_b &= -P_{eff} / A_{ck} - P_{eff} \times e_s / W_{bc} + M_{komb.3} / W_{bc} \\
 &= -60773,4804 / 8,2525 - 60773,4804 \times 1,8745 / 5,3607 + \\
 &\quad 199193,2923 / 5,3607 \\
 &= -1126,9014 \text{ kPa} < f_{ti2} \quad \text{maka, AMAN}
 \end{aligned}$$

d. Kontrol tegangan terhadap kombinasi 4

Ketegangan serat atas pada beton,

$$\begin{aligned}
 f_a &= -P_{eff} / A_{ck} + P_{eff} \times e_s / W'_{ac} - M_{komb.4} / W'_{ac} \\
 &= -60773,4804 / 8,2525 + 60773,4804 \times 1,8745 / 6,4474 - \\
 &\quad 199436,6423 / 6,4474 \\
 &= -13214,9741 \text{ kPa} < f_{ci2} \quad \text{maka, AMAN}
 \end{aligned}$$

Ketegangan serat bawah pada beton,

$$\begin{aligned}
 f_b &= -P_{eff} / A_{ck} - P_{eff} \times e_s / W_{bc} + M_{komb.4} / W_{bc} \\
 &= -60773,4804 / 8,2525 - 60773,4804 \times 1,8745 / 5,3607 + \\
 &\quad 199436,6423 / 5,3607 \\
 &= -1081,5059 \text{ kPa} < f_{ti2} \quad \text{maka, AMAN}
 \end{aligned}$$

e. Kontrol tegangan terhadap kombinasi 5

Ketegangan serat atas pada beton,

$$\begin{aligned}
 f_a &= -P_{eff} / A_{ck} + P_{eff} \times e_s / W'_{ac} - M_{komb.5} / W'_{ac} \\
 &= -60773,4804 / 8,2525 + 60773,4804 \times 1,8745 / 6,4474 - \\
 &\quad 135659,7262 / 6,4474 \\
 &= -11078,1483 \text{ kPa} < f_{ci2} \quad \text{maka, AMAN}
 \end{aligned}$$

Ketegangan serat bawah pada beton,

$$\begin{aligned}
 f_b &= -P_{eff} / A_{ck} - P_{eff} \times e_s / W_{bc} + M_{komb.5} / W_{bc} \\
 &= -60773,4804 / 8,2525 - 60773,4804 \times 1,8745 / 5,3607 + \\
 &\quad 135659,7262 / 5,3607 \\
 &= -3651,5068 \text{ kPa} < f_{ti2} \quad \text{maka, AMAN}
 \end{aligned}$$

4.6.11. Kontrol lendutan balok

Pembebanan yang bekerja pada balok akan mengakibatkan suatu balok mengalami lendutan. Dengan kata lain lendutan adalah perubahan bentuk yang disebabkan oleh adanya beban yang bekerja pada balok itu sendiri. Selain itu, lendutan didefinisikan sebagai besaran penyimpangan (*deflection*) yang tidak bisa lebih besar dari persyaratan koefisien terhadap panjang teoritis. Besaran *deflection* dapat ditinjau dari perubahan posisi batang (arah y) sebelum terbebani dengan sudah dikenai beban. Nilai besarnya lendutan dibatasi sesuai dengan kepentingan dan desain suatu bangunan masing-masing. Batas maksimum lendutan yang diijinkan diatur dalam SNI 7833:2012 adalah :

$$\delta = L/240 = 40/240 = 0,1667 \text{ m}$$

a. Defleksi saat kondisi awal

$$\begin{aligned} Q_{pt1} &= 8 \times P_{t1} \times e_s / L^2 \\ &= 8 \times 64551,8640 \times 1,8745 / 40^2 \\ &= 8 \times 64551,8640 \times 1,8745 / 1600 \\ &= 605,0231 \text{ kN/m} \\ Q_{balok} &= 8 \times M_{balok} / L^2 \\ &= 8 \times 74822,6844 / 40^2 \\ &= 8 \times 74822,6844 / 1600 \\ &= 374,1134 \text{ kN/m} \\ \delta_2 &= 1/184 \times (-Q_{pt1} + Q_{balok}) \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_x) \\ &= 1/184 \times (-605,0231 + 374,1134) \times 40^4 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\ &= 1/184 \times (-230,9097) \times 1600 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\ &= -0,0058 \text{ m} \end{aligned}$$

b. Defleksi setelah kehilangan gaya prategang

$$\begin{aligned} Q_{peff} &= 8 \times P_{eff} \times e_s / L^2 \\ &= 8 \times 60773,4804 \times 1,8745 / 40^2 \\ &= 8 \times 60773,4804 \times 1,8745 / 1600 \\ &= 569,6095 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{balok}} &= 8 \times M_{\text{balok}} / L^2 \\
&= 8 \times 74822,6844 / 40^2 \\
&= 8 \times 74822,6844 / 1600 \\
&= 374,1134 \text{ kN/m} \\
\delta_1 &= 1/184 \times (-Q_{\text{peff}} + Q_{\text{balok}}) \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_x) \\
&= 1/184 \times (-569,6095 + 374,1134) \times 40^4 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 1/184 \times (-195,4961) \times 1600 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= -0,0050 \text{ m}
\end{aligned}$$

c. Defleksi pengaruh berat sendiri

$$\begin{aligned}
Q_{\text{MS}} &= 233,2388 \text{ kN/m} \\
\delta &= 5/384 \times Q_{\text{TD}} \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc}) \\
&= 5/384 \times 233,2388 \times 40^4 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 5/384 \times 233,2388 \times 2560000 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 0,0127 \text{ m}
\end{aligned}$$

d. Defleksi pengaruh beban mati tambahan

$$\begin{aligned}
Q_{\text{MA}} &= 56,7921 \text{ kN/m} \\
\delta &= 5/384 \times Q_{\text{MA}} \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc}) \\
&= 5/384 \times 56,7921 \times 40^4 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 5/384 \times 56,7921 \times 2560000 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 0,0031 \text{ m}
\end{aligned}$$

e. Defleksi pengaruh gaya prategang

$$\begin{aligned}
P_{\text{eff}} &= 60773,4804 \text{ kN} \\
Q_{\text{Peff}} &= 8 \times P_{\text{eff}} \times e_s / L^2 \\
&= 8 \times 60773,4804 \times 1,8745 / 40^2 \\
&= 8 \times 60773,4804 \times 1,8745 / 1600 \\
&= 569,6095 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta &= 5/384 \times Q_{\text{Peff}} \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc}) \\
&= 5/384 \times 569,6095 \times 40^4 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 5/384 \times 569,6095 \times 2560000 / (3,19 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= -0,0310 \text{ m}
\end{aligned}$$

f. Defleksi pengaruh susut

$$\begin{aligned}
A_{\text{plat}} &= (B_1 + 2B_2) \times t_1 \\
&= (6,40 + 2 \times 0,60) \times 0,45 \\
&= (7,60) \times 0,45 \\
&= 3,4200 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
e' &= y_a - (h_{\text{plat atas}} / 2) \\
&= 1,6255 - (0,45/2) \\
&= 1,6255 - (0,2250) \\
&= 1,4005 \text{ m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
cf &= k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times (1 - k_{tn}) \\
&= 0,905 \times 3,00 \times 0,938 \times 0,734 \times (1 - 0,20) \\
&= 0,905 \times 3,00 \times 0,938 \times 0,734 \times (0,80) \\
&= 1,4954
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
P_s &= A_{\text{plat}} \times E_c \times \Delta_{su} \times [(1 - e^{-cf}) / cf] \\
&= 3,4200 \times 3,57 \times 10^7 \times 0,0003934 \times [(1 - e^{-1,4954}) / 1,4954] \\
&= 24901,11 \text{ kN}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q_{Ps} &= 8 \times P_s \times e' / L^2 \\
&= 8 \times 24901,11 \times 1,4005 / 40^2 \\
&= 8 \times 24901,11 \times 1,4005 / 1600 \\
&= 174,37 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta &= 5/384 \times Q_{Ps} \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc}) \\
&= 5/384 \times 174,37 \times 40^4 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 5/384 \times 174,37 \times 2560000 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575) \\
&= 0,0095 \text{ m}
\end{aligned}$$

g. Defleksi pengaruh rangkai

Lendutan pada balok setelah *loss of prestress* $\delta_1 = -0,0050$ m

Lendutan pada balok saat transfer $\delta_2 = -0,0058$ m

Lendutan akibat rangkai $\delta = \delta_1 - \delta_2$

$$= -0,0050 - (-0,0058)$$

$$= 0,0009 \text{ m}$$

Lendutan akibat susut dan rangkai $\delta = 0,0009 + 0,0095$

$$= 0,0104 \text{ m}$$

h. Defleksi pengaruh beban lajur

$$P_{TD} = 220,00 \text{ kN}$$

$$\delta = 1/48 P_{TD} \times L^3 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc})$$

$$= 1/48 \times 220,00 \times 40^3 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575)$$

$$= 1/48 \times 220,00 \times 64000 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575)$$

$$= 0,0005 \text{ m}$$

i. Defleksi pengaruh beban rem

$$M_{TB} = 229,1750 \text{ kN}$$

$$\delta = 0,0642 \times M_{TB} \times L^2 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc})$$

$$= 0,0642 \times 229,1750 \times 40^2 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575)$$

$$= 0,0642 \times 229,1750 \times 1600 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575)$$

$$= 0,0000 \text{ m}$$

j. Defleksi pengaruh temperatur

$$\Sigma P_t = 14607,2593 \text{ kN} ; e_p = 1,3328 \text{ cm}$$

$$\delta = 0,0642 \times \Sigma P_t \times e_p \times L^2 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc})$$

$$= 0,0642 \times 14607,2593 \times 1,3328 \times 40^2 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575)$$

$$= 0,0642 \times 14607,2593 \times 1,3328 \times 1600 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575)$$

$$= 0,0033 \text{ m}$$

k. Defleksi pengaruh beban angin

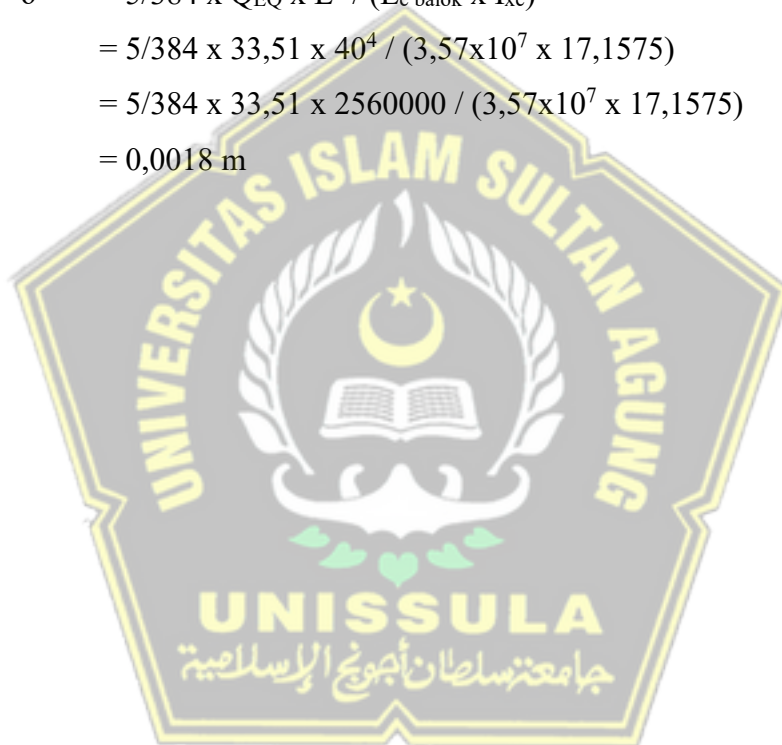
$$Q_{EW} = 4,4100 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned}\delta &= 5/384 \times Q_{EW} \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc}) \\ &= 5/384 \times 4,4100 \times 40^4 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575) \\ &= 5/384 \times 4,4100 \times 2560000 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575) \\ &= 0,0002 \text{ m}\end{aligned}$$

l. Defleksi pengaruh beban gempa

$$Q_{EQ} = 33,51 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned}\delta &= 5/384 \times Q_{EQ} \times L^4 / (E_c \text{ balok} \times I_{xc}) \\ &= 5/384 \times 33,51 \times 40^4 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575) \\ &= 5/384 \times 33,51 \times 2560000 / (3,57 \times 10^7 \times 17,1575) \\ &= 0,0018 \text{ m}\end{aligned}$$



Kontrol lendutan terhadap kombinasi beban terangkum dalam Tabel 4.26.

Tabel 4.26. Kontrol lendutan

No	Jenis beban	Lendutan	Kombinasi 1	Kombinasi 2	Kombinasi 3	Kombinasi 4	Kombinasi 5
1	Berat sendiri	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127	0,0127
2	Mati tambahan	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031	0,0031
3	Susut-rangkak	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104	0,0104
4	Prategang	-0,0310	-0,0310	-0,0310	-0,0310	-0,0310	-0,0310
5	Lajur "D"	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	-
6	Rem	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-
7	Temperatur	0,0033	-	0,0033	-	0,0033	-
8	Angin	0,0002	-	-	0,0002	0,0002	-
9	Gempa	0,0018	-	-	-	-	0,0018
Lendutan			-0,0043	-0,0011	-0,0041	-0,0008	-0,0030
Keterangan			<0,1667 (OK)	<0,1667 (OK)	<0,1667 (OK)	<0,1667 (OK)	<0,1667 (OK)

4.6.12. Perencanaan Pilar

Untuk tahap perencanaan dimensi pilar adalah dengan mendapatkan nilai beban dan momen dari beban kombinasi *box girder*.

$$P_u = 9538,57 \text{ kN}$$

$$M_u = 203489,59 \text{ kNm}$$

$$f_c' = 41,5 \text{ Mpa}$$

$$f_y = 420 \text{ Mpa}$$



Gambar 4.23. Gaya pada pilar

Dengan anggapan awal diambil rasio tulangan $\rho = 2\% = 0,02$, rencana dimensi pilar persegi dihitung dengan rumus pendekatan sebagai berikut :

$$A_g \geq \frac{P_u}{0,4 \times (f_c' + f_y \times \rho)}$$

keterangan :

A_g = luas penampang (mm^2)

P_u = gaya aksial

f_c' = kuat tekan (MPa)

f_y = kuat tarik (MPa)

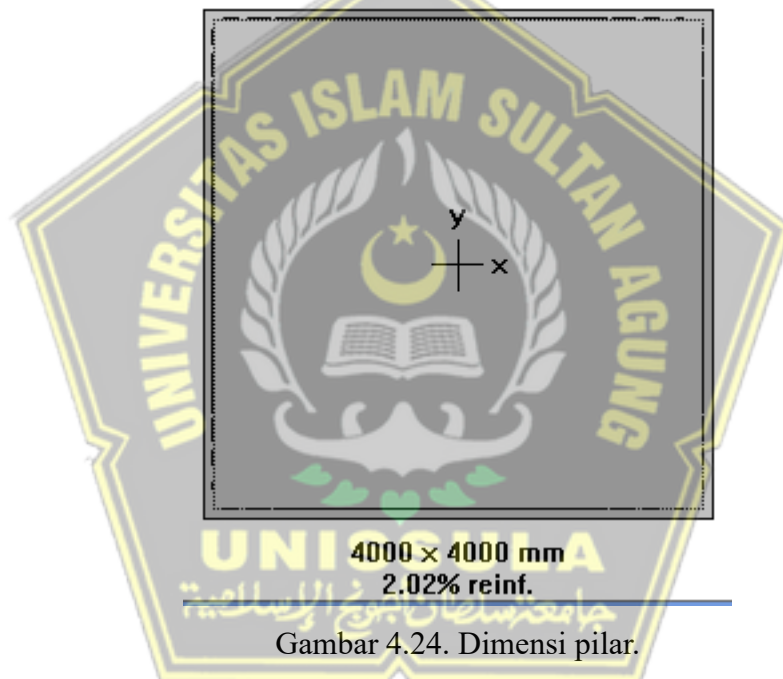
ρ = rasio tulangan (%)

$$\begin{aligned}
 A_g &\geq \frac{P_u}{0,4 \times (f_c' + f_y \times \rho)} \\
 &\geq \frac{9538,57 \times 1000}{0,4 \times (41,5 + 420 \times 0,02)} \\
 &\geq 477884,26 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan luas penampang diatas dapat digunakan untuk menentukan dimensi pilar. Pilar sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 b = h &= \sqrt{477884,26} \\
 &= 691,29 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Diambil ukuran pilar yang digunakan 4000 mm x 4000 mm.



Gambar 4.24. Dimensi pilar.

Menentukan tulangan yang akan dipakai pada penulangan struktur *pier*. Anggapan awal yang di gunakan yaitu menggunakan dimensi 29 (Ulir).

Diameter tulangan yang digunakan adalah D29.

$$\begin{aligned}
 \text{Luas tulangan : } A_s &= \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \\
 &= \frac{1}{4} \times 3,14 \times 29^2 \\
 &= 660,18 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan kebutuhan tulangan pada struktur *pier* sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah tulangan yang dibutuhkan : } n &= \frac{\rho \times b \times h}{A_s} \\
 &= \frac{2 \% \times 4000 \times 4000}{660,18} \\
 &= \frac{32000}{490,6250} \\
 &= 484,71 \approx 488 \text{ D } 29
 \end{aligned}$$

Jadi, perencanaan struktur *pier* dapat disimpulkan menggunakan dimensi 4000 mm x 4000 mm dengan diameter tulangan 29 (D29) Ulir serta jumlah tulangan yang digunakan yaitu 488 atau dapat di tuliskan 488D29 (Ulir).

Untuk mengetahui desain struktur *pier* yang akan digunakan aman atau tidak, dengan menggunakan bantuan *software* PCA Column.



Gambar 4.25. *General Information* PCA Column

Tahap pertama menggunakan PCA Column yaitu input *General Information* dapat dilihat pada Gambar 4.25.

Gambar 4.26. *Material properties* PCA Column

Setelah input data pada *General Information*. Tahap kedua yaitu input data pada *Material Properties* PCA Column dapat dilihat pada Gambar 4.26.

Gambar 4.27. Ukuran dimensi pilar

Setelah input data *Material Properties*, tahap ketiga yaitu input dimensi pilar yang dipakai atau didesain dapat dilihat pada Gambar 4.27.

Size	Db	Ab	W/b
#25	25	491	3.85
#29	29	661	5.186
#32	32	804	6.31
#40	40	1257	9.88
#50	50	1963	15.414

Gambar 4.28. Jenis tulangan yang di pakai

Setelah input dimensi pilar yang di pakai, tahap keempat yaitu membuat jenis tulangan yang akan dipakai dapat dilihat pada Gambar 4.28.

Gambar 4.29. Kebutuhan tulangan

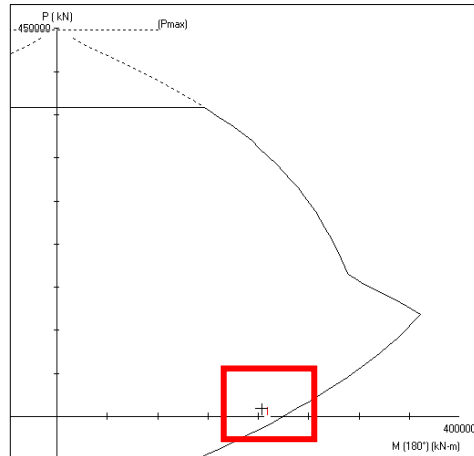
Setelah input jenis tulangan, tahap kelima yaitu input kebutuhan tulangan yang dipakai pada struktur *pier* yang dapat dilihat pada Gambar 4.29.

No.	P	Mx	My
1	9538	-203489	0

Gambar 4.30. Input gaya pada pier

Setelah input kebutuhan tulangan, tahap terakhir yaitu input gaya pada *pier* seperti Gambar 4.30.

Melakukan *running* pada PCA Column. Output yang diberikan berupa diagram interaksi sebagai berikut :



Gambar 4.31. Diagram interaksi

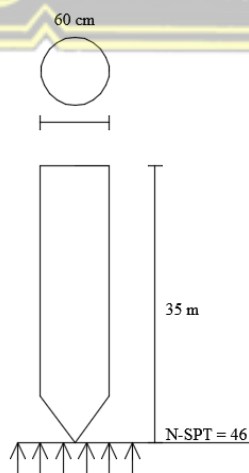
Pada Gambar 4.31., tanda (+) menunjukkan beban yang terjadi. Kesimpulan yang diperoleh berdasarkan Gambar 4.31. adalah struktur pilar aman terhadap aksial dan lentur.

4.6.13. Perhitungan Pondasi

Untuk tahapan awal perhitungan pondasi memperhatikan nilai N-SPT tanah serta melakukan anggapan awal diameter pancang yang akan dipakai. Untuk perhitungan ini menggunakan metode mayerhof dengan meninjau hasil N-SPT tanah setempat. Dapat dilihat pada Gambar 4.32. untuk diameter yang digunakan, kedalaman hingga bertemu tanah keras dan nilai N-SPT tanah keras.

- Menentukan tahanan ujung tiang

Metode Mayerhof (menggunakan hasil penyelidikan N-SPT).



Gambar 4.32. Penampang pondasi.

Kohesi underdrained. Kohesi yaitu suatu gaya yang saling tarik menarik antar partikel tanah, dinyatakan dalam berat per satuan luas. Kohesi tanah akan semakin besar jika kekuatan gesernya makin besar. Berikut merupakan perhitungan kohesi.

Kohesi underdrained,

$$\begin{aligned} c_u &= N\text{-SPT} \times 2/3 \times 10 \\ &= 46 \times 2/3 \times 10 \\ &= 306,60 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Selanjutnya menghitung tahanan ujung tiang per satuan pancang sebagai berikut :

Tahanan ujung tiang,

$$\begin{aligned} Q_p &= 9 \times c_u \times A_p \\ &= 9 \times 306,60 \times (1/4 \times \pi \times d^2) \\ &= 9 \times 306,60 \times (1/4 \times 3,14 \times 0,60^2) \\ &= 9 \times 306,60 \times (0,2826) \\ &= 779,80 \text{ kn/m}^2 \\ &= 77,98 \text{ ton} \end{aligned}$$

b. Menentukan tahanan gesek selimut tiang

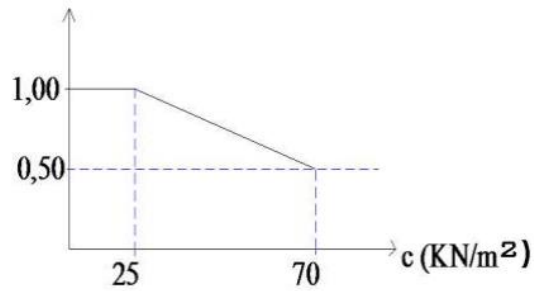
Tahanan gesek selimut tiang (Q_s) dibedakan menjadi dua yaitu tanah pasir dan tanah lempung. Untuk rumus Q_s sebagai berikut :

$$\begin{aligned} Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \end{aligned}$$

keterangan:

p	= keliling penampang tiang	(m)
ΔL	= panjang lapisan tanah	(m)
α	= faktor adhesi	
c_u	= undrained shear strength	(kN/m ²)

Nilai α didapat dari grafik API metode 2, 1986.



Gambar 4.33. Grafik API metode 2, 1986.

x	$x < 25$	$25 < x < 70$	$x > 70$
Nilai	0,50	Perbandingan segitiga	1,00

- Tanah kedalaman 0-5 m

$$N\text{-SPT} = 7,4$$

$$\begin{aligned} c_u &= 0,6 \times N\text{-SPT} \\ &= 0,60 \times 7,40 \\ &= 4,40 \text{ ton/m}^2 \\ &= 44 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk $c_u = 44 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,7889$ (mengacu Gambar 4.33 Grafik API)

$$\begin{aligned} f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \\ &= 0,7889 \times 44 \\ &= 34,71 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (\pi \times d) \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (3,14 \times 0,60) \times 5 \times 34,71 \\ &= 326,96 \text{ kN} \\ &= 32,61 \text{ ton} \end{aligned}$$

- Tanah kedalaman 6-10 m

$$N\text{-SPT} = 17$$

$$\begin{aligned} c_u &= 0,6 \times N\text{-SPT} \\ &= 0,60 \times 17 \\ &= 10,20 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

$$= 102 \text{ kN/m}^2$$

Untuk $c_u = 102 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,5$ (mengacu Gambar 4.33 Grafik API).

$$\begin{aligned} f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \\ &= 0,5 \times 102 \\ &= 51 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (\pi \times d) \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (3,14 \times 0,60) \times 5 \times 51 \\ &= 480,42 \text{ kN} \\ &= 48 \text{ ton} \end{aligned}$$

- Tanah kedalaman 11-15 m

$$N\text{-SPT} = 24$$

$$\begin{aligned} c_u &= 0,6 \times N\text{-SPT} \\ &= 0,60 \times 24 \\ &= 14,40 \text{ ton/m}^2 \\ &= 144 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk $c_u = 144 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,5$ (mengacu Gambar 4.33 Grafik API)

$$\begin{aligned} f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \\ &= 0,5 \times 144 \\ &= 72 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (\pi \times d) \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (3,14 \times 0,60) \times 5 \times 72 \\ &= 678,24 \text{ kN} \\ &= 67,82 \text{ ton} \end{aligned}$$

- Tanah kedalaman 16-20 m

$$N\text{-SPT} = 13,60$$

$$\begin{aligned} c_u &= 0,60 \times N\text{-SPT} \\ &= 0,60 \times 13,60 \\ &= 8,16 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

$$= 81,60 \text{ kN/m}^2$$

Untuk $c_u = 81,60 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,5$ (mengacu Gambar 4.33 Grafik API).

$$\begin{aligned} f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \\ &= 0,5 \times 81,60 \\ &= 40,8 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (\pi \times d) \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (3,14 \times 0,60) \times 5 \times 40,8 \\ &= 384,33 \text{ kN} \\ &= 38,43 \text{ ton} \end{aligned}$$

- Tanah kedalaman 21-25 m

$$N\text{-SPT} = 9,80$$

$$\begin{aligned} c_u &= 0,6 \times N\text{-SPT} \\ &= 0,6 \times 9,80 \\ &= 5,88 \text{ ton/m}^2 \\ &= 58,80 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk $c_u = 58,80 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,62$ (mengacu Gambar 4.33 Grafik API).

$$\begin{aligned} f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \\ &= 0,62 \times 58,80 \\ &= 36,45 \text{ kN/m}^2 \\ Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (\pi \times d) \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (3,14 \times 0,60) \times 5 \times 36,45 \\ &= 343,41 \text{ kN} \\ &= 34,34 \text{ ton.} \end{aligned}$$

- Tanah kedalaman 26-30 m

$$N\text{-SPT} = 26,40$$

$$\begin{aligned} c_u &= 0,60 \times N\text{-SPT} \\ &= 0,60 \times 26,40 \\ &= 15,80 \text{ ton/m}^2 \end{aligned}$$

$$= 158 \text{ kN/m}^2$$

Untuk $c_u = 158 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,5$ (mengacu Gambar 4.33 Grafik API).

$$\begin{aligned} f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \\ &= 0,5 \times 158 \\ &= 79 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (\pi \times d) \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (3,14 \times 0,60) \times 5 \times 79 \\ &= 744,18 \text{ kN} \\ &= 74,41 \text{ ton} \end{aligned}$$

- Tanah kedalaman 31-35 m

$$N\text{-SPT} = 40,40$$

$$\begin{aligned} c_u &= 0,60 \times N\text{-SPT} \\ &= 0,60 \times 40,40 \\ &= 24,20 \text{ ton/m}^2 \\ &= 242 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

Untuk $c_u = 242 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,5$ (mengacu Gambar 4.33 Grafik API).

$$\begin{aligned} f_{\Delta v} &= \alpha \times c_u \\ &= 0,5 \times 242 \\ &= 121 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_s &= p \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (\pi \times d) \times \Delta L \times f_{\Delta v} \\ &= (3,14 \times 0,60) \times 5 \times 121 \\ &= 1139,8 \text{ kN} \\ &= 113,98 \text{ ton} \end{aligned}$$

Setelah menghitung Q_s setiap kedalaman 5 meter, langkah berikutnya menghitung Q_s ultimit atau tahanan gesek selimut beton.

$$\begin{aligned} Q_{s \text{ total}} &= 32,61 + 48 + 67,82 + 38,43 + 74,41 + 113,98 + 34,34 \\ &= 429,59 \text{ ton} \end{aligned}$$

c. Daya dukung vertikal

Daya Dukung vertikal yaitu penjumlahan dari tahanan ujung tiang (Q_p) dengan tahanan gesek selimut beton (Q_s) dan dibagi dengan *design factor* (F_s). Berikut merupakan nilai rekap Q_p dan Q_s pada perhitungan sebelumnya.

$$Q_p = 77,90 \text{ ton}$$

$$Q_s = 429,59 \text{ ton}$$

$$Q_{ultimate} = Q_p + Q_s$$

$$= 77,90 + 429,59$$

$$= 507,49 \text{ ton}$$

Dari perhitungan di atas di peroleh nilai 507,49 ton berikutnya menentukan nilai F_s yang akan digunakan. Dapat dilihat pada Tabel 4.27.

Tabel 4.27. *Design factor for safety*

Classification of Structure	Acceptable Probability of Failure	Design Factor of Safety			
		Good Control	Normal Control	Poor Control	Very Poor Control
Monumental	10^{-5}	2,3	3,0	3,5	4,0
Permanent	10^{-4}	2,0	2,5	2,8	3,5
Temporary	10^{-3}	1,4	2,0	2,3	2,8

Nilai F_s yang akan dipakai 2,5. Perhitungan $Q_{allowable}$ adalah sebagai berikut.

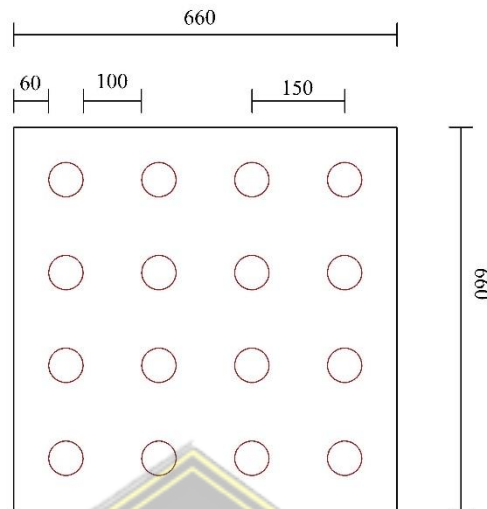
$$Q_{allowable} = \frac{Q_{ult}}{F_s}$$

$$= \frac{507,49}{2,5}$$

$$= 202,99 \text{ ton}$$

Jadi, diperoleh nilai $Q_{allowable}$ sebesar 202,99 ton.

d. Daya dukung pondasi kelompok tiang (*group pile*)



Gambar 4.34. Desain *pile cap*

Melakukan perumpamaan awal untuk kebutuhan pancang pada *pile cap* yang akan digunakan terlebih dahulu. Selanjutnya perhitungan efisiensi kelompok tiang, sebagai berikut :

Converse-Labarre equation:

$$\eta = 1 - \left[\frac{(\eta_1 - 1) \cdot \eta_2 + (\eta_2 - 1) \cdot \eta_1}{90 \times \eta_1 \times \eta_2} \right] \times \theta ;$$

$$\text{dimana } \theta = \tan^{-1} \left(\frac{D}{d} \right)$$

Keterangan :

η = efisiensi kelompok tiang

η_1 = jumlah baris tiang

η_2 = jumlah tiang dalam satu baris

D = diameter tiang

d = jarak pusat ke pusat tiang

Jawaban:

$$\eta_1 = 4$$

$$\eta_2 = 4$$

$$D = 60 \text{ cm}$$

$$d = 150 \text{ cm}$$

berikut adalah perhitungan θ :

$$\begin{aligned}\theta &= \tan^{-1} \left(\frac{D}{d} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{60}{150} \right) \\ &= 22,90\end{aligned}$$

Menghitung efisiensi kelompok tiang, yang dapat diperoleh melalui perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}\eta &= 1 - \left[\frac{(\eta_1 - 1) \cdot \eta_2 + (\eta_2 - 1) \cdot \eta_1}{90 \times \eta_1 \times \eta_2} \right] \times \theta \\ &= 1 - \left[\frac{(4 - 1) \cdot 4 + (4 - 1) \cdot 4}{90 \times 4 \times 4} \right] \times 22,90 \\ &= 1 - 0,38 \\ &= 0,62 \\ &= 62\%\end{aligned}$$

Menghitung $Q_{ultimate (group)}$ sebagai berikut :

$$\begin{aligned}Q_{ultimate (group)} &= m \times Q_{ultimate (single)} \times \eta \\ &= (4 \times 4) \times 507,49 \times 0,62 \\ &= 5034,3 \text{ ton}\end{aligned}$$

Didapatkan nilai $Q_{ultimate (group)}$ sebesar 5034,3 ton, menghitung $Q_{allowable}$ dengan nilai F_s yang di gunakan sebesar 2,5.

$$\begin{aligned}Q_{allowable} &= \frac{Q_{ultimate (group)}}{F_s} \\ &= \frac{5034,3}{2,5} \\ &= 2013,72 \text{ ton}\end{aligned}$$

Didapatkan nilai $Q_{allowable}$ sebesar 2013,72 ton.

e. Beban yang diterima pondasi

- Mencari momen (M)

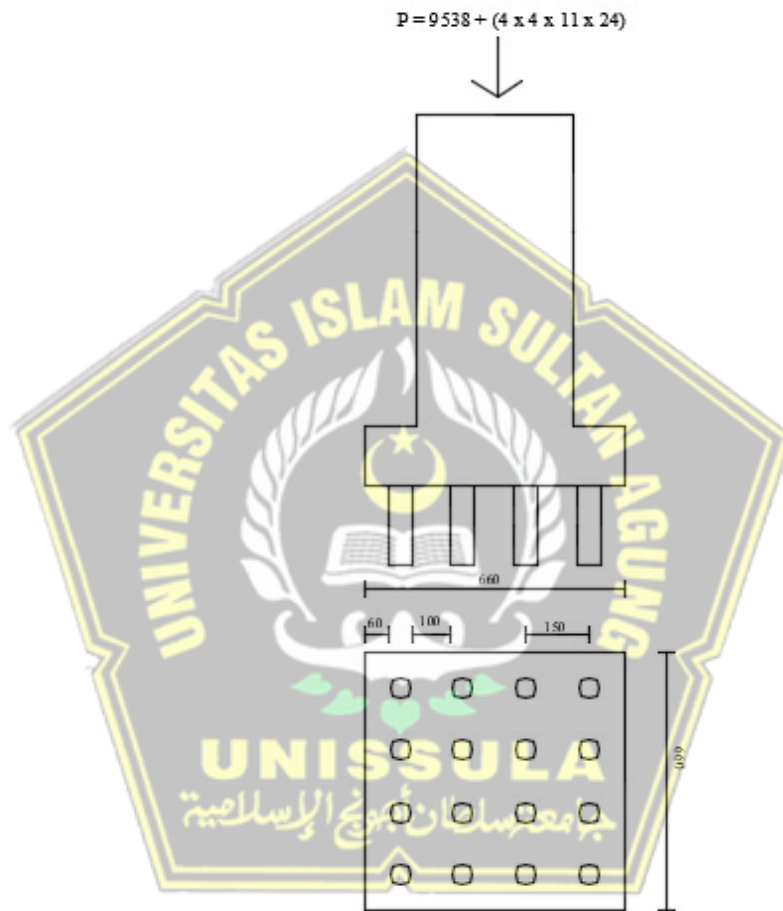
Tahap awal perhitungan beban yang diterima pondasi dimulai dari perhitungan momen. Seperti pada perhitungan di bawah ini :

$$\begin{aligned}M &= 0,1 \times Q_{allowable} \times \text{jumlah tiang} \times \text{tinggi pile cap} \\ &= 0,1 \times 2013,72 \times 16 \times 1,5 \\ &= 4832,92 \text{ ton}\end{aligned}$$

Momen yang didapatkan yaitu 4832,92 ton.

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{M}{4 \times 4 \times (0,6)^2} \\ &= \frac{4832,92}{5,76} \\ &= 839 \text{ ton}\end{aligned}$$

Nilai α didapatkan sebesar 839 ton.



Gambar 4.35. Beban pada pondasi

Pada Gambar 4.35. merupakan gambar beban yang diterima oleh pondasi dengan spesifikasi ukuran pile cap 660 cm x 660 cm x 150 cm dengan jumlah pancang 16 buah.

- Mencari Beban (P)

Sebelum masuk perhitungan $P_{\max}$ menghitung P terlebih dahulu. Untuk perhitungan P berada pada di bawah ini.

$$\begin{aligned}
 P &= (0,4 \times Q_{\text{allowable}} \times \text{jumlah tiang}) + (P + (4 \times 4 \times 11 \times 24)) \\
 &= (0,4 \times 2013,72 \times 16) + (953,8 + 4224) \\
 &= 12887,8 \text{ ton} + 5177,8 \text{ ton} \\
 &= 18065,6 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Didapatkan nilai P sebesar 18065,6 ton. Perhitungan nilai $P_{\max}$ dapat diketahui dengan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &= V_{pt} \times V_m \\
 &= \frac{P}{n_1 \times n_2} + \alpha \times I_3 \\
 &= \frac{18065,6}{4 \times 4} + 839 \times 0,75 \\
 &= 1758,35 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, perencanaan pondasi yang sudah direncanakan dapat disimpulkan melalui persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 P_{\max} &< Q_{\text{allowable}} \\
 1758,35 \text{ ton} &< 2013,72 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas dapat dibuktikan bahwa pondasi yang direncanakan pada perencanaan jembatan *box girder* aman.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diambil dari perencanaan *box girder* untuk jembatan kereta api adalah sebagai berikut :

1. Pembebanan pada jembatan diperhitungkan sesuai dengan standar sebagaimana diatur dalam PM. No 60 tahun 2012 tentang persyaratan teknis jalur kereta api dan SNI 2833:2016 tentang Perencanaan jembatan terhadap beban gempa. Pembebanan yang perlu diperhitungkan untuk perencanaan jembatan kereta api yaitu beban sendiri, beban mati tambahan, beban rel, beban lajur, gaya rem, beban angin, pengaruh temperatur dan beban gempa. Beban mati tambahan pada perencanaan jembatan kereta api berupa beban genangan air hujan, beban lapisan balas, beban bantalan, dan beban rel. Diperoleh beban akibat berat sendiri sebesar 233,2388 kN/m, beban mati tambahan sebesar 56,7921 kN/m, beban lajur sebesar 916,70 kN, gaya rem sebesar 229,1750 kN, beban angin sebesar 4,41 kN/m, pengaruh temperatur sebesar 243,35 kN/m dan beban gempa sebesar 33,5059 kN/m.
2. Perencanaan jembatan kereta api menggunakan penampang *box girder* yang terdiri dari 10 segmen dengan bentang 40 meter. Tinggi penampang *box girder* sebesar 3,80 meter dengan tebal slab atas sebesar 0,45 meter, tebal dinding tepi 0,45 meter dan tebal slab bawah 0,35 meter. Adapun total tendon yang digunakan berjumlah 18 tendon dimana tiap tendon terdiri dari 30 strands dengan beban putus minimal tiap satu strands, $P_{bs} = 188,43$ kN.
3. Dimensi *pile cap* untuk perencanaan jembatan *box girder* adalah 6,60 meter x 6,60 meter dengan tinggi 1,5 meter. Dalam satu pile cap terdiri dari 16 buah tiang pondasi dimana masing-masing tiang memiliki diameter 0,60 meter dengan kedalaman 35 meter.

5.2. Saran

Menyadari akan adanya kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini, berikut adalah saran untuk memperbaiki atau meneruskan hasil perencanaan jembatan kereta api.

1. Melakukan perbandingan terhadap tipe jembatan selain menggunakan struktur *box girder*, sehingga dapat diketahui kelebihan dan kekurangannya masing-masing.
2. Dalam perencanaan jembatan disarankan untuk mencoba menggunakan *software* misalnya SAP2000, sehingga mendapat hasil yang lebih detail.



DAFTAR PUSTAKA

- Admin. (2022, 28 April). *Apa Itu Bored Pile? Fungsi, Jenis, Keunggulan dan Kekurangannya*. Rumah.com. <https://www.rumah.com/panduan-properti/bored-pile-64416>
- Antonius. (2022). *Bahan ajar Perancangan Beton Prategang*. Fakultas Teknik. Universitas Islam Sultan Agung.
- Badan Standardisasi Nasional. (2012). *Tata cara perancangan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung* (SNI 7833: 2012). <https://www.bsn.go.id/>
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). *Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung* (SNI 2847-2013). <https://www.bsn.go.id/>
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *Pembebanan untuk Jembatan* (SNI 1725 : 2016). <https://www.bsn.go.id/>
- Badan Standardisasi Nasional. (2016). *Perencanaan Jembatan terhadap Beban Gempa* (SNI 2833 : 2016). <https://www.bsn.go.id/>
- Budiadi, Andri. (2008). *Desain Praktis Beton Prategang*. Andi Offset.
- Civeng, Mas. (2015, 20 Agustus). *Proses Pembuatan Beton Pascatarik*. Ilmutekniksipilindonesia. <https://www.ilmuteknipsipilindonesia.com/2015/08/proses-pembuatan-beton-pascatarik.html>
- Cholida, Nur Fithriani F, Antonius, F. Ni'am. (2018). *A Parametric Study of Confinement Effects to the Interaction Diagram of P-M for High-Strength Concrete Columns*. Advanced Civil and Environmental Engineering, 1(1), 30-37. DOI: 10.30659/jacee.1.1.30-37
- Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Badan Pengembangan Sumber Daya Manusia. (2018). *Pemeriksaan Inventarisasi Jembatan*. Pusat Pendidikan dan Pelatihan Jalan, Perumahan, Permukiman, dan Pengembangan Infrastruktur Wilayah.
- Lin, T., dan Burn, N. (1988). *Desain Struktur Beton Prategang*. Jakarta: Erlangga.
- Menteri Perhubungan. (2012). *Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api* (PM.60 Tahun 2012). <https://jdih.dephub.go.id/>
- National Association of Australian State Road Authorities. (1976). *NAASRA Bridge Design Specification*.
- Nawy, Edward G. (1998). *Beton Bertulang suatu Pendekatan Dasar*. Refika Aditama.

Perusahaan Jawatan Kereta Api. (1986). *Perencanaan Konstruksi Jalan Rel* (Peraturan Dinas No.10).

Prasetyo, Eko. (2010). *Jembatan Nasional Suramadu, Konstruksi Approach Bridge*. Eko Prasetyo. Seminar dan Pameran Haki 2010. *Perkembangan dan Kemajuan Konstruksi Indonesia*. <https://dokumen.tips/documents/balanced-cantilever-suramadu.html>

Ramadhan, Mildariezka Salsabila, Fikri Alami, Mohd. Isneini, Vera Agutriana Noorhidana. (2023). *Study of The Behavior of Anchor Connections in Concrete Based on Finite Element Analysis*. Advanced Civil and Environmental Engineering, 6(1), 1-11. DOI: 10.30659/jacee.6.1. 1-11

Struyk, J.H., Van Der Veen, W.C.H.K. (1984). *Jembatan*. Pradnya Paramita.

Tinga, Angelo. (2021, 14 Mei). *PSC Segmental Box Girder Bridge Design*. Midasbridge. <https://www.midasbridge.com/en/blog/bridgeinsight/psc-segmental-box-girder-bridge-design>

Tumpu, Miswar, Rangan, Parea Rusan. (2020). *Struktur Beton Prategang Teori dan Prinsip Desain*. Ir. Imam Rohani, ST., MT

