

TUGAS AKHIR

ANALISA JEMBATAN BOX GIRDER PRESTRESS

Diajukan untuk memenuhi tugas-tugas dan
Untuk syarat-syarat memperoleh gelar sarjana
Pada Fakultas Teknik program studi Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara

Diajukan Oleh :

MUHAMMAD REZKI

1307210079



PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA

2018

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan oleh:

Nama : Muhammad Rezki
NPM : 1307210079
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Analisa Jembatan *Box Girder Prestress*
Bidang ilmu : Struktur

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 06 Maret 2018

Mengetahui dan Menyetujui:

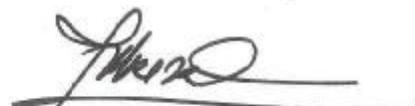
Dosen Pembimbing I


Dr. Ade Faisal, S.T, M.Sc

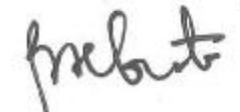
Dosen Pembimbing II


Ir. Tondi Amirsyah Patra Pulungan, S.T, M.T

Dosen Pembanding I


Dr. Fahrizal Zulkarnain, S.T, M.Sc

Dosen Pembanding II


Bambang Hadibroto, S.T, M.T

Program Studi Teknik Sipil

Ketua,


Dr. Fahrizal Zulkarnain, S.T, M.Sc

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Lengkap : Muhammad Rezki
Tempat/Tanggal Lahir : Tanjung Alam/06 Februari 1995
NPM : 1307210079
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“ Analisa Jembatan Box Girder Prestress ”

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 06 Maret 2018



Saya yang menyatakan,

Muhammad Rezki

ABSTRAK

ANALISA JEMBATAN BOX GIRDER PRESTRESS

Muhammad Rezki

1307210079

Dr. Ade Faisal, S.T.,M.Sc.

Tondi Amirsyah Putra Pulungan,S.T, M.T.

Dewasa ini perkembangan pengetahuan tentang perencanaan suatu bangunan berkembang semakin luas, termasuk salah satunya pada perencanaan pembangunan sebuah jembatan yang berkembang luas sejalan dengan kemajuan peradaban manusia. Jembatan merupakan suatu struktur konstruksi yang memungkinkan route transportasi melalui sungai, danau, kali, jalan raya, jalan kereta api dan lain-lain. Dengan seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, jembatan mulai berkembang dari yang dahulunya hanya dibuat dengan kayu sekarang telah berubah menggunakan material beton ataupun baja. Kemudian seiring berkembangnya teknologi tentang beton, mulailah orang membuat jembatan dengan teknologi beton prategang. Dalam tugas akhir ini akan direncanakan jembatan menggunakan profil *box girder* dengan bentang 150 m dengan lebar 17 meter. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui nilai kehilangan gaya prategang yang terjadi pada gelagar jembatan. Perencanaan ini berdasarkan pada peraturan-peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang berlaku. Analisa struktur akan dijalankan dengan bantuan program SAP 2000 v.11. Pada kesimpulan di tugas akhir ini bahwasanya nilai kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *box girder type single cellular* adalah 14,166 %, sedangkan pada *box girder type twin cellular* adalah 16,106 %.

Kata kunci: jembatan, *box girder*, *prestress*.

ABSTRACT

BRIDGE ANALYSIS OF BOX GIRDER PRESTRESSES

Muhammad Rezki

1307210079

Dr. Ade Faisal, S.T.,M.Sc.

Tondi Amirsyah PutraPulungan, S.T, M.T.

Today the development of knowledge about the planning of a building is growing more widely, including one of them in planning the construction of a bridge that developed widely in line with the progress of human civilization. The bridge is a construction structure that allows the route of transportation through rivers, lakes, times, highways, railroads and others. With the development of science and technology, the bridge began to develop from the former only made with wood has now been changed using concrete or steel material. Then as the technology develops about concrete, people start to build bridges with prestressed concrete technology. In this final project will be planned bridge using girder box profile with span 150 m with width 17 meter. The purpose of this final task is to know the value of loss of prestressing style that occurs on the bridge girder. This planning is based on the applicable Indonesian National Standard (SNI) regulations. Analysis of the structure will be run with the help of SAP 2000 v.11 program. At the conclusion in this final task that the value of losing prestressing that occurs in the box type girder single cellular is 14.166%, while the box girder type twin cellular is 16.106%.

Keywords: bridge, box girder, prestress

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan kesehatan dan kesempatan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulisan Tugas Akhir yang berjudul “ANALISA JEMBATAN BOX GIRDER PRESTRESS” ini dimaksudkan untuk memenuhi syarat penyelesaian Pendidikan Sarjana pada Fakultas Teknik program studi Teknik Sipil di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, penulis menghadapi berbagai kendala. Tetapi, karena bantuan dan dukungan serta bimbingan dari berbagai pihak, penulisan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada pihak yang berperan yaitu:

1. Bapak Dr. Ade Faisal, S.T.,M.Sc, sebagai Wakil Dekan I Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, sekaligus sebagai Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan waktu, dukungan, masukan serta bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Tondi Amirsyah Putra Pulungan, M.T, sebagai Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan waktu, dukungan, masukan serta bimbingan kepada penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Irma Dewi, S.T, M.Si, sebagai sekretaris Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, sekaligus sebagai Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberi masukan serta bimbingannya selama penulis melaksanakan masa studi.
4. Bapak Dr. Fahrizal Zulkarnain, S.T, M.Sc, selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberi masukan dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Bambang Hadibroro, S.T, M.T, selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberi masukan dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T, M.T selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

7. Seluruh Dosen pengajar di Fakultas Teknik, Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah membimbing dan memberikan pengajaran kepada penulis selama menempuh masa studi di Fakultas Teknik, Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
8. Seluruh staf dan pegawai Fakultas Teknik, Teknik Sipil Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
9. Kepada kedua orang tua penulis Ayahanda Poniran dan Ibunda Aidil Fitriani Siagian, yang tidak pernah henti memberikan doa, dukungan, motivasi, kasih sayang dan segalanya selama ini. Adik saya, Muhadi Prabudi, Wahyu Ariansyah, Ragel Ade putra, serta Nur Chasanah Wijayaningrum. Dan seluruh keluarga besar saya yang selalu mendukung dan membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
10. Seluruh sahabat saya yang telah sangat banyak membantu saya mulai dari proses awal pengerjaan Tugas Akhir ini hingga selesai: Alif Zabawi, Muhammad Nahari Harahap, S.T, Said Zulhamsyah, S.T, Dicky Alamsyah, S.T, Mustaqim Yusuf, S.T, Rizky Aniswan, Rizki Andika Nasution, Safrial, Irvan Rinaldy, Bang Mawardi, Fifi dan semua yang tidak dapat disebutkan seluruhnya, terima kasih atas semangat dan bantuannya selama ini.

Saya menyadari bahwa dalam penyusunan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, saya menerima kritik dan saran yang membangun dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhir kata saya ucapkan terima kasih dan semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Medan, 26 Februari 2018

Penulis

(Muhammad Rezki)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR NOTASI	xvi
BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Pembatasan Masalah	3
1.4. Tujuan Perencanaan	4
1.5. Manfaat Perencanaan	4
1.6. Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Jembatan	6
2.1.1. Umum	6
2.1.2. Klasifikasi Jembatan	7
2.1.3. Dasar Pemilihan Tipe Jembatan	8
2.1.3.1. Keadaan Struktur Tanah Pondasi	8
2.1.3.2. Faktor Peralatan dan Tenaga Teknis	8
2.1.3.3. Faktor Bahan dan Lokasi	9
2.1.3.4. Faktor Lingkungan	9
2.1.4. Bagian Struktur Jembatan	10
2.1.4.1. Struktur Bangunan Atas Jembatan (<i>Upper/Super-Structure</i>)	11
2.1.4.2. Struktur Bangunan Bawah Jembatan (<i>Sub-Structure</i>)	11
2.2. Jembatan <i>Box Girder</i>	12
2.2.1. Umum	12

2.2.2. <i>Box Girder</i> Dengan Ketinggian Konstan	12
2.2.3. <i>Box Girder</i> Dengan Ketinggian Bervariasi	13
2.2.4. Metode Konstruksi	13
2.3. Pembebanan Pada Jembatan	17
2.3.1. Aksi Tetap	18
2.3.2. Aksi Lalu-Lintas	19
2.3.3. Aksi Lingkungan	24
2.4. Beton Prategang	28
2.4.1. Konsep Dasar	28
2.4.2. Sistem Prategang dan Pengangkeran	34
2.4.2.1. Pratarik	34
2.4.2.2. Pasca Tarik	35
2.4.3. Material Beton Prategang	35
2.4.3.1. Beton	35
2.4.3.2. Baja Tendon	36
2.5. Analisa Prategang	45
2.5.1. Kehilangan Prategang	46
2.5.1.1. Kehilangan Gaya Prategang Langsung	47
2.5.1.2. Kehilangan Gaya Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu	48
2.6. Perencanaan <i>End Block</i>	50
2.6.1. Distribusi Tegangan	50
2.7. Panjang <i>Transfer</i> dan Penyaluran pada Komponen Struktur Pratarik dan Desain Penulangan Angkur	52
2.7.1. Daerah Angkur Pasca Tarik	54
2.7.2. Metode Analisa Elastis Linier untuk Menentukan Tulangan Pengekang	55
2.7.3. Metode <i>Strut and Tie</i> untuk Penulangan Blok Ujung Pengekang	56
2.8. Tegangan Tumpu Izin	60

BAB 3 METODELOGI

3.1. Perencanaan Awal (<i>Preliminary Design</i>)	61
3.2. Kriteria Desain Jembatan	62
3.3. Peraturan Struktur	62
3.4. Spesifikasi Bahan	62
3.5. Tegangan Ijin Bahan	63
3.5.1. Beton Prategang ($f'c$) = 49,8 Mpa	63
3.5.2. Baja Prategang	64
3.6. Perencanaan Struktur Sekunder	65
3.6.1. Perhitungan Tiang Sandaran	65
3.6.2. Penulangan	67
3.6.3. Trotoar	68

BAB 4 ANALISA DAN PERHITUNGAN

4.1. Perencanaan Struktur <i>Primer</i>	70
4.1.1. <i>Priliminary Design</i>	70
4.1.2. Perencanaan Dimensi <i>Box Girder</i>	70
4.1.2.1. <i>Box Girder Type Single Cellular</i>	70
4.1.3. Analisa Pembebanan	76
4.2. Gaya <i>Prestress</i> , Eksentrisitas Dan Jumlah Tendon	82
4.2.1. Gaya <i>Prestress</i>	82
4.2.2. Posisi tendon	86
4.3. Analisa Kehilangan Gaya Prategang	93
4.3.1. Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Langsung	93
4.3.1.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Perpendekan Beton Secara Elastis (ES)	93
4.3.1.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Pada Tendon (Ps)	93
4.3.1.3. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Slip Pada Angkur (ANC)	94
4.3.2. Kehilangan Gaya Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu	95
4.3.2.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat	

Rangkak Beton	96
4.3.2.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Beban Susut beton (SH)	97
4.3.2.3. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Baja (RE)	98
4.4. Tegangan Yang Terjadi Akibat Gaya <i>Prestress</i>	99
4.5. Tegangan Pada <i>Box Girder</i> Akibat Beban	101
4.6. Metode Beban Ekuivalen	107
4.7. Kontrol Tegangan Kombinasi Pembebanan Terhadap Beban Layan	108
4.8. Perhitungan Penulangan <i>Box Girder</i>	109
4.8.1. Pelat Dinding	110
4.8.2. Pelat Bawah	111
4.8.3. Pelat Atas	112
4.9. Perencanaan <i>End Block</i>	114
4.10. Perencanaan Dimensi <i>Box Girder</i>	117
4.10.1. <i>Box Girder Type Twin Cellular</i>	117
4.11. Analisa Pembebanan	122
4.12. Gaya <i>Prestress</i> , Eksentrisitas Dan Jumlah Tendon	128
4.12.1. Gaya <i>Prestress</i>	128
4.12.2. Posisi tendon	132
4.13. Analisa Kehilangan Gaya Prategang	139
4.13.1. Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Langsung	139
4.13.1.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Perpendekan Beton Secara Elastis (ES)	139
4.13.1.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Pada Tendon (Ps)	140
4.13.1.3. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Slip Pada Angkur (ANC)	141
4.13.2. Kehilangan Gaya Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu	142
4.13.2.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat	

Rangkak Beton	142
4.13.2.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Beban Susut beton (SH)	143
4.13.2.3. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Baja (RE)	144
4.14. Tegangan Yang Terjadi Akibat Gaya <i>Prestress</i>	145
4.15. Tegangan Pada <i>Box Girder</i> Akibat Beban	147
4.16. Metode Beban Ekuivalen	153
4.17. Kontrol Tegangan Kombinasi Pembebanan Terhadap Beban Layan	154
4.18. Perhitungan Penulangan <i>Box Girder</i>	155
4.18.1. Pelat Dinding	156
4.18.2. Pelat Bawah	157
4.18.3. Pelat Atas	158
4.19. Perencanaan <i>End Block</i>	160
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	163
5.1.1. <i>Box Girder Type Single Cellular</i>	163
5.1.2. <i>Box Girder Type Twin Cellular</i>	164
5.2. Saran	166
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1: Tipe Jembatan dan Aplikasi Panjang Jembatan (Chen & Duan, 2000).	10
Tabel 2.2: Jumlah Lajur Lalu-Lintas Rencana (RSNI T-02-2005).	19
Tabel 2.3: Kecepatan angin rencana.	25
Tabel 2.4: Koefisien seret C_w .	25
Tabel 2.5: Faktor kepentingan (RSNI T-02-2005).	27
Tabel 2.6: Faktor Tipe Bangunan (RSNI T-02-2005).	28
Tabel 2.7: Kabel-kabel untuk beton prategang (<i>Post-tensioning Institute</i>).	38
Tabel 2.8: <i>Strand</i> Standar Tujuh kawat Untuk Beton Prategang (<i>Standar specification of ASTM A-416</i>).	38
Tabel 2.9: Data teknis kawat batangan dari <i>dywidag</i> (<i>Dywidag</i>).	39
Tabel 2.10: Contoh pengangkur dari <i>type Dywidag</i> (<i>Dywidag</i>).	40
Tabel 2.11: Data-data teknis dongkrak VSL.	42
Tabel 4.1: Ketentuan sayap atas profil <i>box girder</i> .	71
Tabel 4.2: Dimensi profil melintang <i>box girder</i> .	72
Tabel 4.3: Perhitungan <i>properties section box girder prestress</i> .	72
Tabel 4.4: Posisi tendon didalam <i>box girder</i> .	90
Tabel 4.5: Kombinasi tegangan	108
Tabel 4.6: Tegangan kombinasi I	108
Tabel 4.7: Tegangan kombinasi II	108
Tabel 4.8: Tegangan kombinasi III	109
Tabel 4.9: Tegangan kombinasi IV	109

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1: Sketsa potongan memanjang rencana jembatan.	3
Gambar 2.1: Tipikal Struktur Jembatan (Chen & Duan, 2000).	10
Gambar 2.2: Jembatan dengan <i>box girder</i> dengan ketinggian konstan.	13
Gambar 2.3: Jembatan dengan <i>box girder</i> dengan ketinggian bervariasi.	13
Gambar 2.4: Metode konstruksi dengan menggunakan sistem perancah (VSL).	14
Gambar 2.5: Metode konstruksi dengan menggunakan <i>system launching</i> (VSL).	14
Gambar 2.6: Metode konstruksi dengan menggunakan <i>system launching gantry</i> (VSL).	15
Gambar 2.7: Metode konstruksi dengan menggunakan <i>system lifting frame</i> (VSL).	15
Gambar 2.8: Metode konstruksi dengan menggunakan <i>system crane</i> (VSL).	16
Gambar 2.9: Metode konstruksi dengan menggunakan <i>system fullspan</i> (VSL).	16
Gambar 2.10: Metode konstruksi dengan menggunakan <i>system form traveler</i> (VSL).	17
Gambar 2.11: Beban Lajur “D” (RSN T-02-2005).	20
Gambar 2.12: Penyebaran Pembebanan Pada Arah Melintang (RSNI T-02-2005).	21
Gambar 2.13: Pembebanan Truk “T” 500 kN (RSNI T-02-2005).	22
Gambar 2.14: Pembebanan untuk pejalan kaki (RSN R-02-2005).	24
Gambar 2.15: Koefisien geser dasar (C) Plastik untuk analisa statis (RSNI T-02-2005).	26
Gambar 2.16: Distribusi Tegangan Sepanjang Penampang Beton Prategang konsentris (Lin & Burns, 1981).	31
Gambar 2.17: Momen penahanan Internal pada beton prategang dan beton bertulang (Lin & Burns, 1981).	32

Gambar 2.18: Balok beton menggunakan Baja Mutu Tinggi (Lin & Burns, 1981).	33
Gambar 2.19: Balok prategang dengan Tendon Parabola (Lin & Burns, 1981).	33
Gambar 2.20: Proses Pengerjaan Beton Pratarik (<i>Pre-tensioning</i>) (Andri, 2008).	34
Gambar 2.21: Proses Pengerjaan Beton Pasca tarik (<i>Post-tensioning</i>) (Andri, 2008).	35
Gambar 2.22: Jenis-jenis Baja yang dipakai untuk Beton Prategang (Hurst, 1998).	37
Gambar 2.23: <i>Strands</i> Prategang 7 Kawat Standard dan Dipadatkan (Nawy, 1998).	37
Gambar 2.24: Contoh kawat batangan dari <i>Dywidag</i> (<i>Dywidag</i>).	39
Gambar 2.25: Contoh pemakaian kawat batangan <i>prestress</i> (<i>Dywidag</i>).	40
Gambar 2.26: Sistem pengangkuran <i>system Dywidag</i> (<i>Dywidag</i>).	41
Gambar 2.27: Dongkrak hidrolik <i>system Dywidag</i> (<i>Dywidag</i>).	42
Gambar 2.28: System pengangkuran System VSL (VSL).	43
Gambar 2.29: Dongkrak hidrolik <i>system VSL</i> (VSL).	45
Gambar 2.30: Prategang Eksentris (Raju, 1998).	46
Gambar 2.31: Zona Angkur ujung untuk Tendon Terlekat.	52
Gambar 2.32: Panjang penyaluran untuk <i>strand</i> prategang.	53
Gambar 2.33: Skema jejak gaya tekan pada model tekan dan tarik.	57
Gambar 2.34: Model <i>Strut and Tie</i> Tipikal untuk Zona Angkur Ujung.	58
Gambar 2.35: Rangka Batang Ideal pada Model <i>Strut and Tie</i> di kasus Eksentris dan Konsentris.	59
Gambar 3.1: Penampang Box Girder <i>Type Single Cellular</i> .	61
Gambar 3.2: Penampang Box Girder <i>Type Twin/Multi Cellular</i> .	61
Gambar 4.1: Potongan melintang profil gelagar jembatan.	71
Gambar 4.2: Bagian <i>section properties</i> pada gelagar jembatan.	72
Gambar 4.3: Spesifikasi potongan melintang <i>box girder</i> yang direncanakan.	75
Gambar 4.4: Posisi tendon di dalam <i>box girder</i> .	86

Gambar 4.5: Momen yang terjadi pada jembatan setelah diberi beban ekuivalen.	107
Gambar 4.6: Angkur hidup VSL <i>type 22 Sc</i> .	114
Gambar 4.7: Pembesian pada <i>End Block</i> .	116

DAFTAR NOTASI

- a = tinggi alat angkur.
- A = luas maksimum pada bagian dari permukaan pendukung secara geometris sama dengan luas yang dibebani dan konsentris dengannya.
- A_b = luas netto efektif plat tumpu yang dihitung sebagai luas A_g dikurangi dengan luas lubang-lubang di plat tumpu.
- A_g = luas *bruto* plat tumpu.
- C = koefisien geser dasar waktu dan kondisi setempat yang sesuai.
- C = faktor relaksasi.
- CR = kehilangan tegangan akibat rangkakan.
- Cw = koefisien seret yang besarnya tergantung dari perbandingan dari lebar total jembatan dengan tinggi bangunan atas termasuk tinggi bagian sandaran yang masif (b/d).
- db = diameter nominal tendon prategang.
- e = eksentrisitas alat angkur.
- E_c = modulus elastisitas beton saat umur beton 28 hari.
- E_{cs} = 300×10^{-6} untuk struktur pra tarik.
- E_s = modulus elastisitas baja prategang.
- ES = kehilangan tegangan akibat perpendekan elastic.
- f_b = beban *tendon* terfaktor maksimum P_u dibagi dengan luas tumpu efektif A_b .
- F_c = tegangan pada penampang.
- f_{cd} = tegangan pada beton akibat beban mati tambahan setelah prategang diberikan.
- f_{ci} = tegangan pada beton pada level pusat baja segera setelah transfer.
- f'_{ci} = kuat tekan beton pada saat diberi tegangan.
- fpe = tegangan prategang efektif sesudah kehilangan gaya prategang.
- fps = tegangan pada baja prategang dengan kekuatan nominal.
- g = percepatan gravitasi (m/s^2).
- h = tinggi penampang.
- I = faktor kepentingan.
- J = faktor waktu.

- K = Koefisien *Wooble*.
 K_{cr} = koefisien rangkai = 2,0 untuk pratarik
 = 1,6 untuk pasca tarik
 K_{RE} = koefisien relaksasi.
 K_H = Koefisien beban gempa horizontal.
 K_P = kekakuan gabungan sebagai gaya horizontal yang diperlukan untuk menimbulkan satu satuan lendutan pada bagian atas pilar (kN/m).
 L_{AV} = panjang bentang rata-rata dari kelompok bentang yang disambungkan secara menerus.
 L_{max} = panjang bentang maksimum dalam kelompok bentang yang disambungkan secara menerus.
 L_x = panjang kabel yang ditinjau.
 P_i = gaya prategang awal.
 P_o = gaya *prestress* yang terjadi akibat *jacking*.
 S = Faktor tipe bangunan.
 S_{CS} = regangan susut sisa total dengan harga.
 SH = kehilangan tegangan akibat susut.
 T = waktu getar dalam detik untuk free body dengan satu derajat kebebasan.
 T_{EQ} = gaya geser total dalam arah yang ditinjau (kN).
 V = kecepatan angin rencana (m/dt) untuk keadaan batas yang ditinjau.
 W_{TP} = berat total nominal bangunan atas termasuk beban mati tambahan ditambah setengah berat dari pilar (kN).
 W_r = berat total nominal bangunan yang mempengaruhi percepatan gempa, diambil sebagai beban mati ditambah beban mati tambahan (kN).
 α = perubahan sudut akibat pengaruh kelengkungan.
 μ = koefisien friksi.
 $\sum P_{su}$ = jumlah dari beban *tendon* terfaktor.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transportasi merupakan sarana yang digunakan oleh manusia dalam melakukan berbagai interaksi sesama manusia sebagaimana halnya makhluk sosial. Interaksi tersebut dapat berupa interaksi sosial, ekonomi, politik, maupun budaya. Oleh karena itu transportasi tidak boleh dipandang sebelah mata, karena hal tersebut sangat berpengaruh sekali pada kehidupan sekelompok orang tertentu di daerah tertentu. Mengingat pentingnya sarana transportasi dalam kehidupan manusia, maka diperlukan sarana transportasi yang baik diantaranya adalah jalan dan jembatan.

Jembatan struktur yang dibangun untuk menghubungkan jalan yang terputus oleh rintangan seperti sungai, lembah, laut. Pada awalnya jembatan dibuat sangat sederhana dengan menggunakan kayu. Seiring dengan berkembangnya ilmu pengetahuan dan teknologi, jembatan mulai dibuat dengan beton atau beton yang dikompositkan dengan baja. Kemudian, dengan berkembangnya teknologi beton, mulailah orang-orang membuat jembatan dengan menggunakan beton prategang. Jembatan yang merupakan bagian dari jalan, sangat diperlukan dalam sistem jaringan transportasi darat yang akan menunjang pembangunan nasional dimasa yang akan datang. Oleh karena itu, perancangan, pembangunan dan rehabilitasi serta pabrikasi perlu diperhatikan dengan baik, efektif dan seefisien mungkin, sehingga pembangunan jembatan dapat mencapai sasaran umur jembatan yang direncanakan.

Suatu hal yang penting dalam perencanaan jembatan adalah menentukan jenis jembatan yang dibangun. Sehingga dibutuhkan perencanaan yang benar-benar matang dibidang rekayasa. Hal tersebut penting sebagai bahan masukan untuk menentukan material yang akan digunakan, teknik pengerjaan dan waktu serta perawatan jembatan di kemudian hari. Hal ini dibutuhkan untuk dapat merencanakan dan membangun suatu konstruksi jembatan yang cukup kuat, ekonomis, mudah dalam pelaksanaan dan tentunya sesuai dengan waktu yang diharapkan oleh *owner*.

Beton sekarang ini sudah banyak dikenal di dunia konstruksi, karena selain perawatannya yang mudah beton juga dapat menahan beban yang cukup besar bila dibandingkan dengan material lainnya. Seiring dengan kemajuan teknologi dunia konstruksi terus berupaya menciptakan suatu struktur yang kuat dan dapat menekan biaya serta tanpa mengabaikan unsur biaya, mutu, waktu. Dewasa ini telah dikenal beton pratekan, yakni beton yang diberi penekanan terlebih dahulu melalui proses stressing sebelum dibebani. Ternyata teknik tersebut cukup efektif karena selain beton dapat memikul beban yang lebih besar dari sebelumnya dan dapat memperkecil berat sendirinya dan ukuran penampangannya. Hal ini jelas sangat menguntungkan dunia konstruksi karena volume bahan dapat dikurangi sehingga berat profil menjadi lebih ringan dan beban struktur atas yang dipikulkan ke pondasi juga menjadi lebih kecil. Dalam dunia jembatan teknologi beton pratekan sangat jelas sekali manfaatnya.

Dalam tugas akhir ini penulis akan merencanakan jembatan dengan menggunakan struktur *box girder prestressed segmental*. Struktur beton pratekan lebih ekonomis, karena pada beban dan bentang yang sama dapat digunakan profil girder yang lebih kecil. Hal ini karena pada beton pratekan memanfaatkan momen sekunder akibat gaya prategang untuk mengimbangi momen yang ditimbulkan akibat beban luar.

1.2. Perumusan masalah

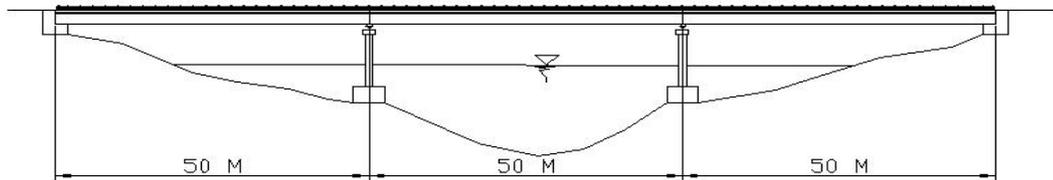
Dari latar belakang tersebut maka akan direncanakan jembatan dengan struktur *box girder prestressed segmental*. Permasalahan yang ditinjau antara lain:

1. Bagaimana merencanakan pendimensian profil *box girder prestress type single cellular* dan *twin cellular*?
2. Bagaimana menganalisa pembebanan terhadap kedua tipe *box girder* terhadap struktur jembatan?
3. Bagaimana menganalisa kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *box girder prestressed*?

1.3. Pembatasan masalah

Permasalahan dalam perancangan beton prategang begitu banyak dan kompleks. Oleh karena itu, penulis membatasi masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Hanya merencanakan dan menganalisa perhitungan *box girder* pada struktur bangunan atas jembatan.
2. Tidak membahas perencanaan dan analisa perhitungan struktur bangunan bawah.
3. Tidak merencanakan perletakan.
4. Teknik pelaksanaan dibahas hanya secara umum.
5. Tidak merencanakan perkerasan jalan di atasnya.
6. Tidak meninjau profil sungai.
7. Data-data yang akan digunakan untuk menentukan dimensi jembatan adalah perencanaan dari penulis dan pembimbing serta tetap mengacu pada peraturan yang ada:
 - a. Panjang jembatan 150 meter dengan bentuk potongan memanjang seperti pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1: Sketsa potongan memanjang rencana jembatan.

- b. Lebar jembatan 17 meter.
 - c. Panjang *section box girder* 50 meter.
 - d. Mutu beton $f_c' = 49,8$ Mpa.
8. Mutu baja pratekan digunakan kabel jenis *strand seven wires stress relieved* (7 kawat untai) dengan mengacu pada tabel ASTM A-416.
9. Standar perencanaan menggunakan:
 - a. RSNI-T-02-2005 Standar Pembebanan Untuk Jembatan.
 - b. RSNI-T-12-2004 Perencanaan Struktur Jembatan Beton.
 - c. Tabel ASTM A-416

1.4. Tujuan Perencanaan

Tujuan dari penyusunan Tugas Akhir ini adalah untuk menjawab permasalahan yang ada, antara lain:

1. Untuk merencanakan pendimensian *profil box girder prestress*.
2. Untuk menganalisa pembebanan *box girder type single cellular* dan *twin cellular* terhadap struktur jembatan.
3. Untuk menganalisa kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *box girder prestressed*.

1.5. Manfaat Perencanaan

Adapun manfaat dari Tugas Akhir ini antara lain:

1. Dapat merencanakan struktur jembatan dengan profil *box girder prestressed* yang sesuai dengan persyaratan struktur yang aman.
2. Dapat memahami konsep perencanaan struktur jembatan yang menggunakan profil *box girder prestressed*.
3. Sebagai alternatif lain dalam teknik perencanaan jembatan dengan bentang yang cukup panjang dan medan yang cukup sulit.

1.6. Sistematika Penulisan

Untuk memberikan gambaran umum, maka penulisan tugas akhir ini di bagi dalam 5 (lima) bab. Pembagian dimaksudkan untuk mempermudah pembahasan, dimana uraian yang dibuat dalam perencanaan ini dapat dimengerti. Pembagian dalam perencanaan yang dimaksud adalah:

BAB 1 PENDAHULUAN

Dalam bab ini dikemukakan tentang latar belakang penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini dikemukakan teori-teori yang di jadikan dasar analisis dan pembahasan masalah, serta beberapa defenisi dari studi pustaka yang berhubungan dengan penelitian.

BAB 3 METODELOGI PENELITIAN

Dalam bab ini dikemukakan pendekatan dari teori kemudian di uraikan menjadi suatu usulan pemecahan masalah yang berbentuk langkah-langkah pemecahan.

BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini dikemukakan tentang kajian atas hasil dari perencanaan dan analisis perencanaan yang direncanakan.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bab ini dikemukakan kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil perencanaan dan memberikan saran berupa rekomendasi perencanaan, cara kerja dan perawatan jembatan.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Jembatan

2.1.1. Umum

Konstruksi jembatan adalah suatu konstruksi bangunan pelengkap sarana transportasi jalan yang menghubungkan suatu tempat ke tempat yang lainnya, yang dapat dilintasi oleh sesuatu benda bergerak misalnya suatu lintas yang terputus akibat suatu rintangan atau sebab lainnya, dengan cara melompati rintangan tersebut tanpa menimbun atau menutup rintangan itu dan apabila jembatan terputus maka lalu lintas akan terhenti. Lintas tersebut bisa merupakan jalan kendaraan, jalan kereta api atau jalan pejalan kaki, sedangkan rintangan tersebut dapat berupa jalan kendaraan, jalan kereta api, sungai, lintasan air, lembah atau jurang.

Jembatan juga merupakan suatu bangunan pelengkap prasarana lalu lintas darat dengan konstruksi terdiri dari pondasi, struktur bangunan bawah dan struktur bangunan atas, yang menghubungkan dua ujung jalan yang terputus akibat bentuk rintangan melalui konstruksi struktur bangunan atas.

Jembatan adalah jenis bangunan yang apabila akan dilakukan perubahan konstruksi, tidak dapat dimodifikasi secara mudah, biaya yang diperlukan relatif mahal dan berpengaruh pada kelancaran lalu lintas pada saat pelaksanaan pekerjaan. Jembatan dibangun dengan umur rencana 100 tahun untuk jembatan besar, minimum jembatan dapat digunakan 50 tahun. Ini berarti, disamping kekuatan dan kemampuan untuk melayani beban lalu lintas, perlu diperhatikan juga bagaimana pemeliharaan jembatan yang baik.

Karena perkembangan lalu lintas yang ada relatif besar, jembatan yang dibangun, biasanya dalam beberapa tahun tidak mampu lagi menampung volume lalu lintas, sehingga biasanya perlu diadakan pelebaran. Untuk memudahkan pelebaran perlu disiapkan desain dari seluruh jembatan sehingga dimungkinkan dilakukan pelebaran dikemudian hari, sehingga pelebaran dapat dilaksanakan dengan biaya yang murah dan konstruksi menjadi mudah.

Pada saat pelaksanaan konstruksi jembatan harus dilakukan pengawasan dan pengujian yang tepat untuk memastikan bahwa seluruh pekerjaan dapat diselesaikan, sesuai dengan tahapan pekerjaan yang benar dan memenuhi persyaratan teknis yang berlaku, sehingga dicapai pelaksanaan yang efektif dan efisien, biaya dan mutu serta waktu yang telah ditentukan.

2.1.2. Klasifikasi Jembatan

Seiring dengan perkembangan teknologi dunia konstruksi, telah banyak permodelan konstruksi jembatan yang bertujuan untuk menciptakan suatu konstruksi yang aman, nyaman, ekonomis, dan mudah pelaksanaannya. Berikut adalah beberapa permodelan konstruksi jembatan yang umum dipakai.

Ditinjau dari berbagai aspek, maka jembatan diklasifikasikan atas:

1. Ditinjau dari material yang digunakan, jembatan dapat dibedakan menjadi 4, yaitu:
 - a. Jembatan kayu.
 - b. Jembatan gelagar baja.
 - c. Jembatan beton bertulang.
 - d. Jembatan komposit.
2. Ditinjau dari statika konstruksi, jembatan dapat dibedakan menjadi 2, yaitu:
 - a. Jembatan statis tertentu.
 - b. Jembatan statis tak tentu.
3. Ditinjau dari fungsi dan kegunaan, jembatan dapat dibedakan menjadi 5, yaitu:
 - a. Jembatan untuk lalu lintas kereta api (*railway bridge*).
 - b. Jembatan untuk lalu lintas biasa atau umum (*highway bridge*).
 - c. Jembatan untuk pejalan kaki (*foot path*).
 - d. Jembatan berfungsi ganda, misalnya untuk lalu lintas kereta api dan mobil, untuk lalu lintas umum dan air minum, dan sebagainya.
 - e. Jembatan khusus, misalnya untuk pipa-pipa air minum, pengairan, pipa gas, jembatan militer dan lain-lain.

4. Ditinjau dari sifat-sifatnya, jembatan dapat dibedakan menjadi 3, yaitu:
 - a. Jembatan sementara atau darurat.
 - b. Jembatan tetap atau permanen.
 - c. Jembatan bergerak, yaitu jembatan yang dapat digerakkan, misalnya agar penyeberangan kapal-kapal disungai tidak terganggu.
5. Ditinjau dari bentuk struktur konstruksi, jembatan bias dibedakan menjadi 5, yaitu:
 - a. Jembatan gelagar biasa (*Beam bridge*).
 - b. Jembatan portal (*Rigid frame bridge*).
 - c. Jembatan rangka (*Truss bridge*).
 - d. Jembatan gantung (*Suspension bridge*).
 - e. Jembatan kabel penahan (*Cable stayed bridge*).

2.1.3. Dasar Pemilihan Tipe Jembatan

Banyak beberapa faktor yang menentukan tipe dari jembatan yang akan dibangun agar bangunan yang akan dibangun efisien dan ekonomis. Adapun faktor-faktor tersebut antara lain:

2.1.3.1. Keadaan Struktur Tanah Pondasi

Untuk tanah pondasi lunak adalah kurang cocok bila dibuat suatu jembatan pelengkung, mengingat gaya horizontal yang besar dan menentukan pondasi tiang pancang miring, yang sulit dilaksanakan. Untuk tanah keras atau batu cadas yang menghubungkan jurang yang dalam, sangat cocok bila dibangun jembatan pelengkung. Selain itu juga sangat cocok di bangun di pegunungan yang memiliki tanah pendasar atau pondasi yang curam. Dengan adanya gaya horizontal pada pondasi, maka gaya geser vertikal pada tanah pondasi bisa diimbangi oleh gaya horizontal, sehingga bahaya longsor dapat dikurangi.

2.1.3.2. Faktor Peralatan dan Tenaga Teknis

Perencanaan jembatan gelagar sederhana, tidak memerlukan keahlian khusus dalam bidang tertentu. Peralatan barat harus dipikirkan dalam perencanaan sebuah jembatan beton yang dicor di tempat lain. Jembatan beton pratekan (*pre-cast*)

dengan bentang 20 meter, yang akan dibangun di daerah pedalaman atau pegunungan tentunya kurang relevan karena akan sulit dalam pengangkutan dan pelaksanaannya yang akan melalui jalan berliku.

2.1.3.3. Faktor Bahan dan Lokasi

Ada kalanya disungai tertentu, bila akan dibangun jembatan, dijumpai banyak sekali batu kerikil yang baik untuk beton dan juga pasir dan batu koral yang bermutu tinggi. Di sana mungkin akan sangat ekonomis bila jembatan dibuat dari beton bertulang, pondasi dari pasangan batu koral dan sebagainya.

Di daerah pantai laut, dimana udara sekeliling mengandung garam, maka perlu dipertimbangkan pemakaian konstruksi baja apakah masih sesuai mengingat faktor perkaratan yang tinggi di daerah tersebut.

2.1.3.4. Faktor Lingkungan

Sebaiknya bentuk jembatan harmonis dengan sekitarnya, agar indah dipandang. Ketentraman batin menentukan dalam ruang gerak kehidupan manusia. Bentuk dan warna alam sekitar mempengaruhi ketentraman jiwa.

Selain faktor di atas, maka perlu dipertimbangkan prinsip pemilihan konstruksi jembatan, sebagai berikut:

1. Konstruksi sederhana (bisa dikerjakan masyarakat).
2. Harga murah (memanfaatkan material lokal).
3. Kuat dan tahan lama (mampu menerima beban lalu lintas).
4. Perawatan mudah dan murah (bisa dilakukan masyarakat).
5. Stabil dan mampu menahan gerusan air.
6. Bentang yang direncanakan adalah yang terpendek.
7. Perencanaan abutment yang dihindari terlalu tinggi.

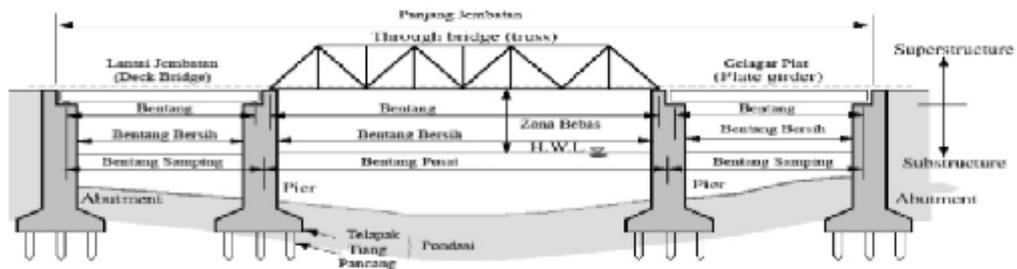
Tipe jembatan umumnya ditentukan oleh faktor seperti beban yang direncanakan, kondisi geografi sekitar, jalur lintasan dan lebarnya, panjang dan bentang jembatan, estetika, persyaratan ruang di bawah jembatan, transportasi material konstruksi, prosedur pendirian, biaya dan masa pembangunan. Tabel 2.1 berikut menunjukkan aplikasi panjang bentang beberapa tipe jembatan.

Tabel 2.1: Tipe Jembatan dan Aplikasi Panjang Jembatan (Chen & Duan, 2000).

No	Tipe Jembatan	Panjang Bentang (m)	Contoh Jembatan dan panjangnya
1	Gelagar Beton <i>Prestress</i>	10-300	Stolmasundet, Norwegia, 301 m
2	Gelagar Baja I / kotak	15-376	Jembatan Stalassa, Italia, 376 m
3	Rangka Baja	40-550	Quebec, Canada, 549 m
4	Baja Lengkung	50-550	Shanghai Lupu, China, 550 m
5	Beton Lengkung	40-425	Wan Xian, China, 425 m (pipa baja berisi beton)
6	Kabel Tarik	110-1100	Sutong, China, 1088 m
7	Gantung	150-2000	Akaski-Kaikyo, Jepang, 1991 m

2.1.4. Bagian Struktur Jembatan

Elemen struktur jembatan sebenarnya dapat dibedakan menjadi bagian atas (*super-structure*) dan bagian bawah (*sub-structure*). Bangunan bawah jembatan menyalurkan beban dari bangunan atas jembatan ke tapak atau pondasi.



Gambar 2.1: Tipikal Struktur Jembatan (Chen & Duan, 2000).

2.1.4.1. Struktur Bangunan Atas Jembatan (*Upper/Super-Structure*)

Bagian struktur ini adalah bagian yang langsung menerima beban yang meliputi berat sendiri, beban mati, beban tambahan, beban lalu lintas kendaraan, gaya rem, dan beban pejalan kaki. Kemudian beban dari struktur tersebut ditransfer ke pondasi atau tapak. Struktur atas jembatan umumnya meliputi:

1. Trotoar, meliputi:
 - a. Sandaran dan tiang sandaran.
 - b. Peninggian trotoar (*kerb*).
 - c. Slab lantai trotoar.
2. Slab lantai kendaraan.
3. Gelagar (*Girder*).
4. Balok diafragma.
5. Ikatan pangku (ikatan angin, ikatan melintang).
6. Tumpuan (*Bearing*).

2.1.4.2. Struktur Bangunan Bawah Jembatan (*Sub-Structure*)

Adalah bagian dari struktur jembatan yang umumnya terletak di sebelah bawah bangunan atas dengan fungsi untuk menerima dan memikul beban dari bangunan atas agar dapat disalurkan kepada pondasi. Bangunan bawah dibagi menjadi 2 (dua) bagian yaitu kepala jembatan (*abutment*) atau pilar (*pier*) dan pondasi untuk kepala jembatan atau pilar. Struktur bangunan bawah perlu didesain khusus sesuai dengan jenis kekuatan tanah dasar dan elevasi jembatan.

1. Pangkal Jembatan (*Abutment*), terdiri dari:
 - a. Dinding belakang (*Back Wall*).
 - b. Dinding penahan (*Breast Wall*).
 - c. Dinding sayap (*Wing Wall*).
 - d. Oprit, pelat injak (*Approach slab*).
 - e. Konsol pendek untuk jacking (*Corbel*).
 - f. Tumpuan (*Bearing*).
2. Pelat jembatan (*Pier*), terdiri dari:
 - a. Kepala pilar (*Pier Head*).
 - b. Pilar (*Pier*), yang berupa dinding, kolom, atau portal.
 - c. Konsol pendek untuk jacking (*Corbel*).
 - d. Tumpuan (*Bearing*).

2.2. Jembatan *Box Girder*

2.2.1. Umum

Beberapa kelebihan penggunaan *box girder*:

1. *Box girder* dapat digunakan untuk jembatan dengan bentang dan panjang yang besar.
2. Bentuk *interior* dari *box girder* memungkinkannya digunakan untuk penggunaan lain seperti jalur pipa gas atau pipa air.
3. Bentuk *box girder* cukup memenuhi nilai estetika pada jembatan sehingga penggunaannya mampu menambah keindahan kota.

Dari segi ketinggian gelagarnya profil *box girder* dibedakan menjadi 2 jenis yaitu:

1. Profil *box girder* dengan ketinggian konstan (*constant depth*).
2. Profil *box girder* dengan ketinggian bervariasi (*variable depth*).

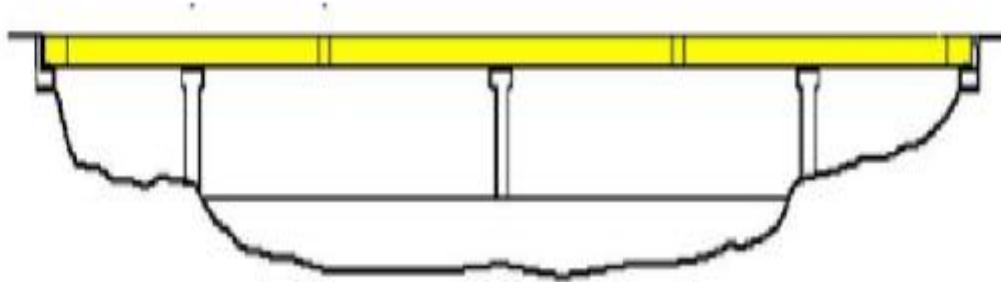
Sebenarnya tidak ada aturan khusus yang digunakan untuk menentukan bentuk *box girder* yang akan digunakan, cuma tergantung kebutuhan pada masing-masing kondisi lapangannya, seperti contoh:

1. Jika memungkinkan, ketinggian tetap lebih baik digunakan pada struktur dengan geometris yang kompleks, dan lebih cocok digunakan pada area kompleks seperti pada daerah perkotaan.
2. Ketinggian bervariasi biasanya digunakan pada jurang yang dalam dan pada sungai besar.

2.2.2. *Box Girder* Dengan Ketinggian Konstan

Untuk struktur dengan bentang utama dengan panjang 65/70 m, gelagar dengan ketinggian konstan lebih umum digunakan karena lebih ekonomis. Karena adanya penghematan dalam pembuatan *bekesting* untuk *deck*.

Pada bentuk ini, ketinggian gelagar antara $1/20$ dan $1/25$ dari panjang bentang maximum. Akan tetapi minimal 2,2 m dibutuhkan untuk memudahkan pergerakan didalam *box girder* tersebut.

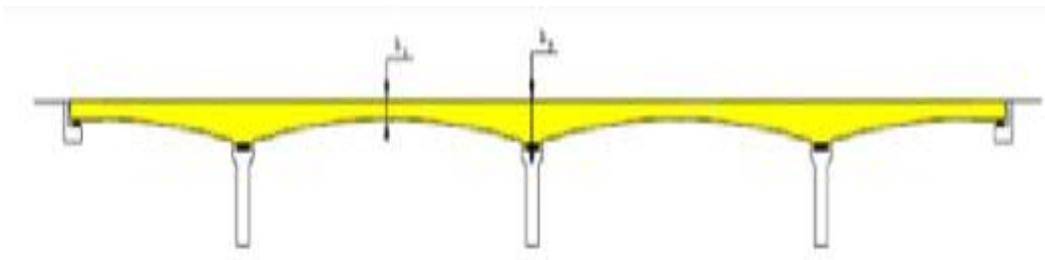


Gambar 2.2: Jembatan dengan *box girder* dengan ketinggian konstan.

2.2.3. *Box Girder* Dengan Ketinggian Bervariasi

Pada bentang utama melebihi 65/70 m akan terjadi beban yang sangat besar pada *cantilever*, dan akan membutuhkan ukuran *box girder* yang sangat besar pada bagian *pier* nya, sedangkan ukuran ini sangatlah berlebihan jika digunakan *box girder* dengan ketinggian bervariasi.

Standarnya ketinggian *box girder* pada bagian *pier* (h_p) antara 1/16 dan 1/18 dari panjang bentang maksimum. Dan pada bagian tengah (h_c) biasanya berukuran 1/30 dan 1/35 dari panjang bentang maksimum.



Gambar 2.3: Jembatan dengan *box girder* dengan ketinggian bervariasi.

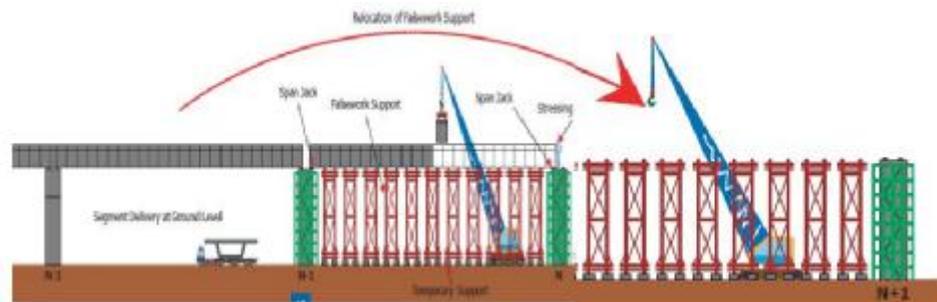
2.2.4. Metode Konstruksi

Salah satu tantangan dalam perencanaan dan pembangunan konstruksi jembatan di lapangan adalah menentukan metode konstruksi dari struktur utama jembatan tersebut. Berikut adalah beberapa metode konstruksi yang umum dilaksanakan di lapangan:

1. Sistem Perancah (*falsework*)
2. Sistem Peluncuran (*launching*)
3. Sistem Kantilever (*balance cantilever*)

1. Sistem Perancah (*falsework*)

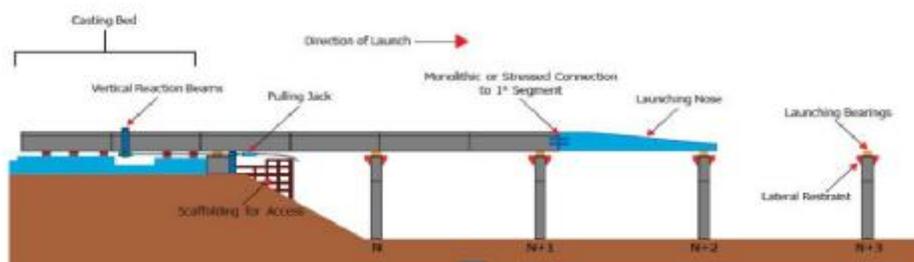
Pada sistem ini balok jembatan dicor (*cast insitu*) atau dipasang (*precast*) diatas landasan yang sepenuhnya didukung oleh sistem perancah, kemudian setelah selesai perancah dibongkar.



Gambar 2.4: Metode konstruksi dengan menggunakan sistem perancah (VSL).

2. Sistem Peluncuran (*launching*)

Pada sistem ini balok dicor disalah satu sisi jembatan, kemudian diluncurkan dengan cara ditarik atau didorong hingga mencapai sisi lain jembatan. Untuk bentang tunggal, sistem ini memerlukan jembatan *launching gantry* atau dua buah *crane* yang bekerja secara bersamaan. Untuk bentang lebih dari satu, sistem ini memerlukan bantuan *launching nose* yang disambung didepan balok. Bila struktur jembatan cukup besar, dan lahan terbatas biasanya digunakan sistem *incremental launching*.



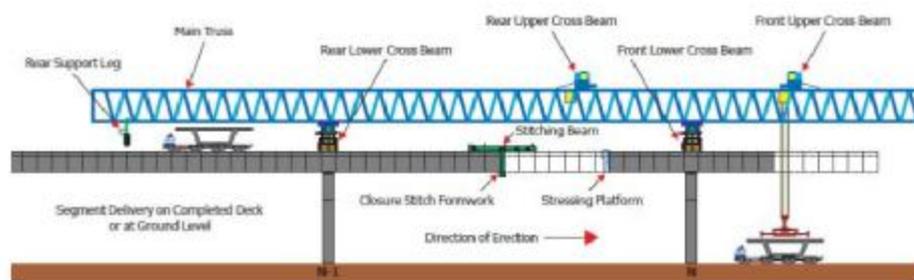
Gambar 2.5: Metode konstruksi dengan menggunakan *system launching* (VSL).

3. Sistem Kantilever (*Balance Cantilever*)

Pada system ini balok jembatan dicor (*cast insitu*) atau dipasang (*precast*), segmen demi segmen sebagai kantilever di kedua sisi agar saling mengimbangi (*balance*) atau satu sisi dengan pengimbang balok beton yang sudah dilaksanakan lebih dahulu. Pada sistem ini diperlukan kabel *prestress* khusus untuk pemasangan tiap segmen. Kabel *prestress* ini hanya berfungsi pada saat *erection* saja, sedangkan untuk menahan beban permanen diperlukan kabel *prestress* tersendiri.

Terdapat beberapa jenis metode konstruksi untuk metode *balance cantilever* ini:

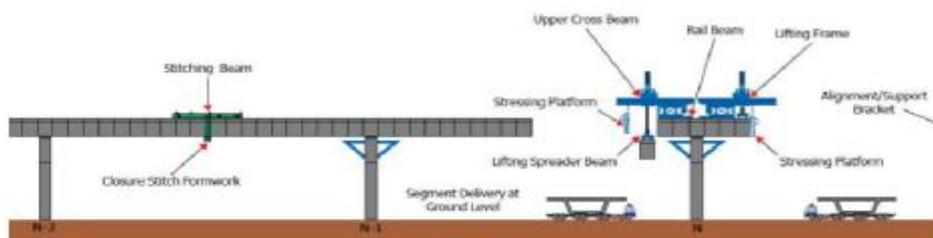
1. Metode *balance cantilever* dengan *launching gantry*



Gambar 2.6: Metode konstruksi dengan menggunakan *system launching gantry* (VSL).

Metode ini digunakan untuk balok yang adalah hasil *precast* dan bukan hasil pengecoran in situ. Pada metoda ini digunakan satu buah *gantry* atau lebih yang digunakan sebagai peluncur segmen segmen *box girder* yang ada.

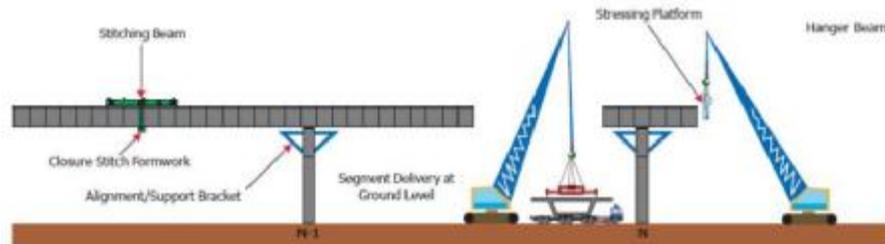
2. Metode *balance cantilever* dengan rangka pengangkat (*lifting frame*)



Gambar 2.7: Metode konstruksi dengan menggunakan *system lifting frame* (VSL).

Pada dasarnya metode ini hampir sama dengan metode *launching gantry*. Perbedaannya cuma pada jenis alat yang digunakan untuk mengangkat segmen segmen jembatannya.

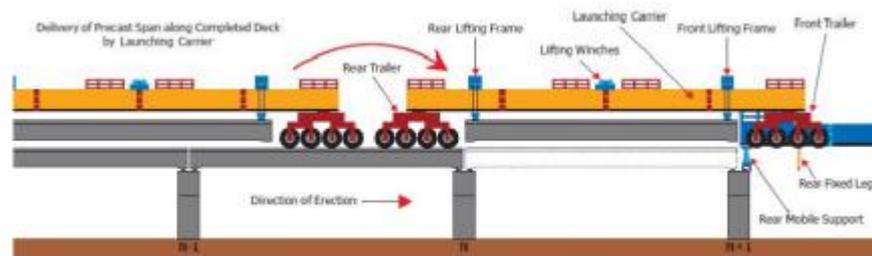
3. Metode *balance cantilever* dengan *crane*



Gambar 2.8: Metode konstruksi dengan menggunakan *system crane* (VSL).

Pada dasarnya metode ini hampir sama dengan metode *lifting frame*. Perbedaannya cuma pada jenis alat yang digunakan untuk mengangkat segmen segmen jembatannya. Pada sistem ini digunakan *crane* untuk mengangkat tiap segmen. Sedangkan pada *lifting frame*, digunakan *lifting frame* untuk mengangkat tiap segmennya.

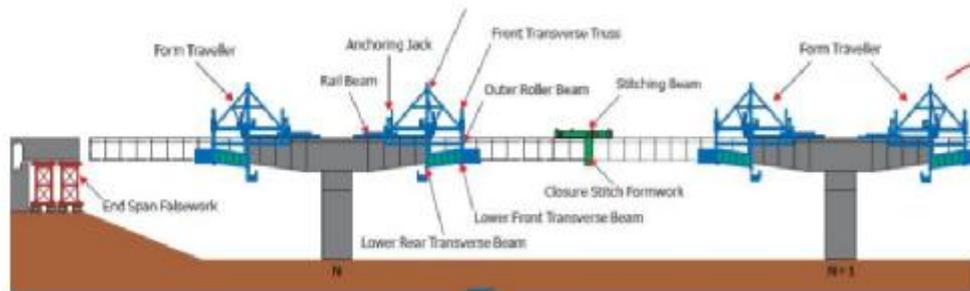
4. Metode *balance cantilever* dengan *system fullspan* (bentang penuh)



Gambar 2.9: Metode konstruksi dengan menggunakan *system fullspan* (VSL).

Pada metoda ini segmen yang diangkat adalah satu segmen penuh untuk satu bentang. Karena itu metoda ini hanya cocok untuk jembatan dimana jarak antar tumpuannya tidaklah besar.

5. Metode *balance cantilever* dengan *form traveler method*



Gambar 2.10: Metode konstruksi dengan menggunakan *system form traveler* (VSL).

Metoda ini digunakan untuk pengecoran beton di tempat (*insitu*). Pada metoda ini digunakan *form traveler* yang digunakan sebagai alat untuk membetuk segmen segmen jembatan sesuai kebutuhan.

2.3. Pembebanan Pada Jembatan

Pembebanan untuk merencanakan jembatan jalan raya merupakan dasar dalam menentukan beban-beban dan gaya-gaya untuk perhitungan tegangan tegangan yang terjadi pada setiap bagian jembatan jalan raya. Penggunaan pembebanan ini dimaksudkan agar dapat mencapai perencanaan yang aman dan ekonomis sesuai dengan kondisi setempat, tingkat keperluan, kemampuan pelaksanaan dan syarat teknis lainnya, sehingga proses pelaksanaan dalam perencanaan jembatan menjadi efektif.

Pembebanan berdasarkan pada muatan dan aksi- aksi yang terjadi pada jembatan berdasarkan peraturan yang ada dalam RSNI T-02-2005.

Aksi-aksi (beban, perpindahan dan pengaruh lainnya) dikelompokkan menurut sumbernya kedalam beberapa kelompok, yaitu:

- Aksi tetap.
- Aksi lalu-lintas.
- Aksi lingkungan (angin, hujan, gempa, dsb).
- Aksi-aksi lainnya.

Berdasarkan lamanya bekerja, aksi dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. Aksi tetap: aksi yang bekerja sepanjang waktu atau pada jangka waktu yang lama.
2. Aksi transient: aksi yang bekerja dalam jangka waktu yang pendek.

2.3.1. Aksi Tetap

a. Beban mati

Beban mati yang terjadi pada struktur ada 2 macam, yaitu berat sendiri dan beban mati tambahan. Beban sendiri jembatan adalah semua beban tetap yang berasal dari berat sendiri jembatan yang ditinjau, termasuk segala unsure tambahan yang dianggap merupakan suatu kesatuan tetap dengannya yang terdiri dari berat masing-masing bagian struktural dan elemen-elemen non-struktural.

Beban mati tambahan adalah berat seluruh bahan yang membentuk elemen non-struktural dan menjadi beban pada jembatan dan besarnya dapat berubah selama umur jembatan.

Kecuali ditentukan oleh instansi berwenang, semua jembatan harus direncanakan untuk bisa memikul beban tambahan yang berupa aspal beton setebal 50 mm untuk pelapisan kembali dikemudian hari. Lapisan ini harus ditambahkan pada lapisan permukaan yang tercantum dalam gambar. Pelapisan kembali merupakan beban nominal yang dikaitkan dengan faktor beban untuk mendapatkan beban rencana.

Pengaruh dari alat pelengkap dan sarana umum yang ditempatkan pada jembatan harus dihitung setepat mungkin. Berat dari pipa untuk saluran air bersih, saluran air kotor dan lainnya harus ditinjau pada keadaan kosong dan penuh sehingga kondisi yang paling membahayakan dapat diperhitungkan.

b. Pengaruh penyusutan dan rangkai

Pengaruh rangkai dan penyusutan harus diperhitungkan dalam perencanaan jembatan-jembatan beton. Pengaruh ini harus dihitung dengan menggunakan beban mati dari jembatan. Apabila rangkai dan penyusutan bias mengurangi pengaruh muatan lainnya, maka harga dari rangkai dan

penyusutan tersebut harus diambil minimum (misalnya pada waktu transfer dari beton prategang).

c. Pengaruh prategang

Prategang akan menyebabkan pengaruh sekunder pada komponen yang terkekang pada bangunan statis tak tentu. Pengaruh sekunder tersebut harus diperhitungkan baik pada batas daya layan ataupun batas ultimate. Prategang harus diperhitungkan sebelum (selama pelaksanaan) dan sesudah kehilangan tegangan dalam kombinasinya dengan beban-beban lainnya.

2.3.2. Aksi Lalu-Lintas

Lajur lalu lintas rencana harus mempunyai lebar 2,75 m. Jumlah maksimum lajur yang digunakan untuk berbagai lebar jembatan bisa dilihat dalam Tabel 2.7. Lajur lalu lintas rencana harus disusun sejajar dengan sumbu memanjang jembatan.

Tabel 2.2: Jumlah Lajur Lalu-Lintas Rencana (RSNI T-02-2005).

Tipe Jembatan	Lebar Jalur Kendaraan (m)	Jumlah Lajur Lalu-Lintas Rencana (n _l)
Satu lajur	4,0 – 5,0	1
Dua arah, Tanpa median	5,5 – 8,25	2 ₍₃₎
	11,3 – 15,0	4
Banyak arah	8,25 – 11,25	3
	11,3 – 15,0	4
	15,1 – 18,75	5
	18,8 – 22,5	6
Catatan (1) Untuk jembatan lain, jumlah lajur lalu-lintas rencana harus ditentukan oleh instansi yang berwenang. Catatan (2) Lebar jalur kendaraan adalah jarak minimum antara kerb atau rintangan untuk satu arah atau jarak antara kerb dengan median untuk banyak arah. Catatan (3) Lebar minimum yang aman untuk dua-lajur kendaraan adalah 6,0 m. Lebar jembatan antara 5,0 m sampai 6,0 m harus dihindari oleh karena hal ini akan memberikan kesan kepada pengemudi seolah-olah memungkinkan untuk menyiap.		

Beban lalu lintas untuk perencanaan jembatan terdiri atas beban lajur "D" dan beban truk "T". Beban lajur "D" bekerja pada seluruh lebar jalur kendaraan dan menimbulkan pengaruh pada jembatan yang ekuivalen dengan suatu iringan

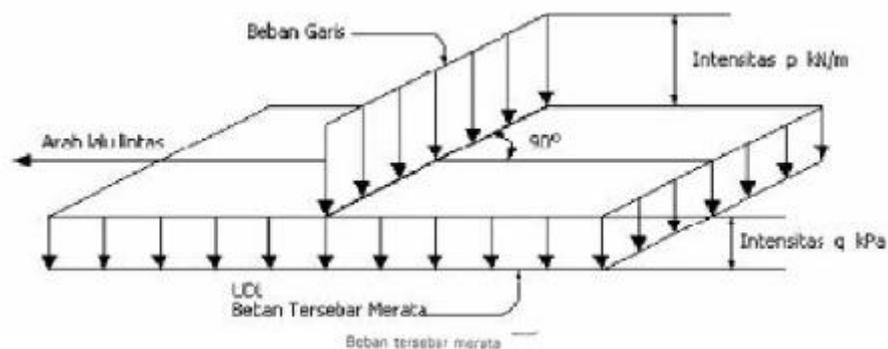
kendaraan yang sebenarnya. Jumlah total beban lajur "D" yang bekerja tergantung pada lebar jalur kendaraan itu sendiri.

Beban truk "T" adalah satu kendaraan berat dengan 3 as yang ditempatkan pada beberapa posisi dalam lajur lalu lintas rencana. Tiap as terdiri dari dua bidang kontak pembebanan yang dimaksud sebagai simulasi pengaruh roda kendaraan berat. Hanya satu truk "T" diterapkan per lajur lalu lintas rencana.

Secara umum, beban "D" akan menjadi beban penentu, sedangkan beban "T" digunakan untuk bentang pendek dan rantai kendaraan.

1. Beban lajur "D"

Beban lajur "D" terdiri dari beban tersebar merata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT) seperti yang terlihat dalam Gambar 2.18.



Gambar 2.11: Beban Lajur "D" (RSN T-02-2005).

- Beban Terbagi Rata (BTR)

Mempunyai intensitas q kPa, dimana besarnya q tergantung pada panjang total yang dibebani L seperti berikut:

$$L \leq 30 \text{ m: } q = 9,0 \text{ kPa} \quad (2.11)$$

$$L > 30 \text{ m: } q = 8,0 \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kPa} \quad (2.12)$$

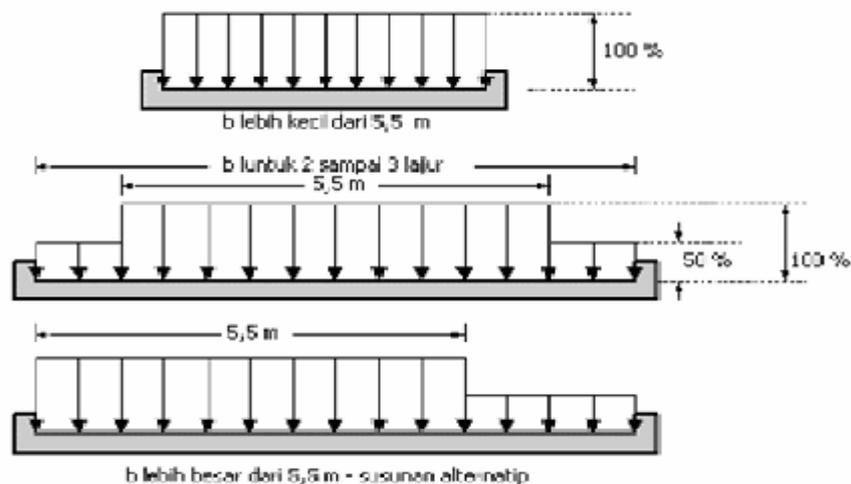
Dengan pengertian q adalah intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan, sedangkan L adalah panjang total jembatan yang dibebani (meter).

- Beban Garis (BGT)

Dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap lalu lintas jembatan. Besar intensitas $p = 49$ kN/m. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum jembatan menerus, BGT kedua identik harus ditempatkan pada posisi dalam dengan arah melintang jembatan pada bentang lainnya.

Beban "D" harus disusun pada arah melintang sedemikian rupa sehingga menimbulkan momen maksimum. Penyusunan komponen BTR dan BGT dari beban "D" pada arah melintang harus sama.

- Bila lebar jalur kendaraan jembatan kurang atau sama dengan 5,5 m, maka beban "D" ditempatkan pada seluruh jalur dengan intensitas 100 %.
- Apabila lebar jalur lebih besar dari 5,5 m, beban "D" ditempatkan pada jumlah lajur lalu lintas rencana (nl) yang berdekatan, dengan intensitas 100 %. Hasilnya berupa beban garis ekuivalen $nl \times 2,75 q$ kN/m dan beban terpusat ekuivalen sebesar $nl \times 2,75 p$ kN, kedua-duanya bekerja berupa strip pada jalur selebar $nl \times 2,75$ m.
- Lajur lalu lintas rencana yang membentuk strip ini bisa ditempatkan dimana saja pada jalur jembatan. Beban "D" tambahan harus ditempatkan pada seluruh lebar sisa dari jalur dengan intensitas sebesar 50 %. Susunan pembebanan ini bisa dilihat dalam Gambar 2.19.

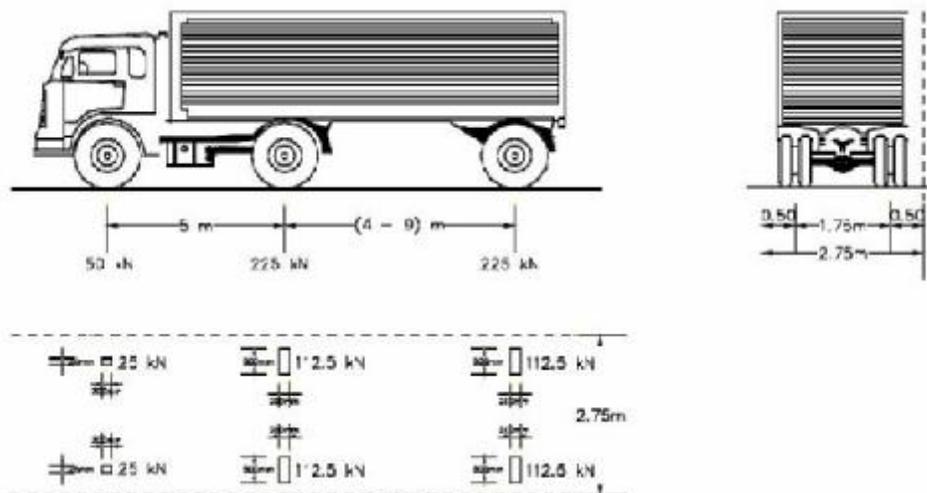


Gambar 2.12: Penyebaran Pembebanan Pada Arah Melintang (RSNI T-02-2005).

2. Pembebanan Truk "T"

Pembebanan truk "T" terdiri dari kendaraan semi-trailer yang mempunyai susunan dan berat as seperti terlihat dalam Gambar 2.20. Berat dari masing-masing as disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai.

Berat dari masing-masing as disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 as tersebut bisa diubah-ubah antara 4 m sampai 9 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan. Untuk menyebarkan pembebanan truk "T" dalam arah melintang terlepas dari panjang jembatan atau susunan bentang, hanya ada satu kendaraan truk "T" yang bisa ditempatkan pada satu lajur lalu-lintas rencana. Kendaraan truk "T" harus ditempatkan di tengah-tengah lajur lalu-lintas rencana.



Gambar 2.13: Pembebanan Truk "T" 500 kN (RSNI T-02-2005).

3. Faktor beban dinamis

Faktor beban dinamis (FBD) merupakan interaksi antara kendaraan yang bergerak dengan jembatan. Besarnya DLA tergantung pada frekuensi dasar dari suspensi kendaraan, biasanya antara 2 sampai 5 Hz untuk kendaraan berat, dan frekuensi dari getaran lentur jembatan. Untuk perencanaan FBD dinyatakan sebagai beban statik ekuivalen. Harga FBD yang dihitung digunakan pada seluruh bagian bangunan yang berada diatas permukaan tanah. Faktor beban

dinamis berlaku pada BGT pada beban lajur "D" dan beban truk "T" untuk simulasi kejut dari kendaraan yang bergerak pada struktur jembatan. FBD diterapkan pada keadaan batas daya layan dan batas ultimate. Untuk bentang tunggal panjang bentang ekuivalen diambil sama dengan panjang bentang sebenarnya. Untuk bentang menerus panjang bentang ekuivalen L_E diberikan dengan rumus:

$$L_E = \sqrt{L_{AV} \times L_{max}} \quad (2.13)$$

Dimana:

L_{AV} = panjang bentang rata-rata dari kelompok bentang yang disambungkan secara menerus.

L_{max} = panjang bentang maksimum dalam kelompok bentang yang disambungkan secara menerus.

Faktor beban dinamis untuk BGT pada beban lajur "D" tergantung pada panjang bentang, sebagai berikut:

$$- \text{Bentang } (L) < 50 \text{ m; FBD} = 0,4 \quad (2.14)$$

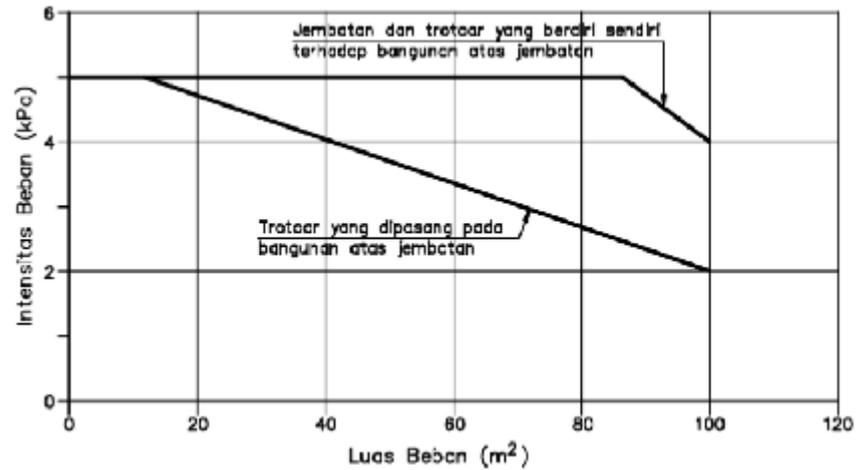
$$- 50 \leq \text{bentang } (L) \leq 90 \text{ m; FBD} = 0,525 - 0,0025 L \quad (2.15)$$

$$- \text{Bentang } (L) > 90 \text{ m; FBD} = 0,3 \quad (2.16)$$

Faktor beban dinamis untuk beban truk "T", FBD diambil 0,3.

4. Pembebanan untuk Pejalan Kaki

Semua elemen dari trotoar atau jembatan penyeberangan yang langsung memikul pejalan kaki harus direncanakan untuk beban nominal 5 kPa. Jembatan pejalan kaki dan trotoar pada jembatan jalan raya harus direncanakan untuk memikul beban per m^2 dari luas yang dibebani seperti pada Gambar 2.21.



Gambar 2.14: Pembebanan untuk pejalan kaki (RSN R-02-2005).

- $A < 10 \text{ m}^2$

$$\text{Intensitas pejalan kaki nominal} = 0,5 \text{ kPa} \quad (2.17)$$

- $10 \text{ m}^2 < A < 100 \text{ m}^2$

$$\text{Intensitas pejalan kaki nominal} = 5,33 - \frac{A}{30} \text{ kPa} \quad (2.18)$$

- $A > 100 \text{ m}^2$

$$\text{Intensitas pejalan kaki nominal} = 2 \text{ kPa} \quad (2.19)$$

2.3.3. Aksi Lingkungan

Aksi lingkungan memasukkan pengaruh temperatur, angin, banjir, gempa dan penyebab alamiah lainnya. Besarnya beban rencana yang diberikan, dihitung berdasarkan analisa statistik dari kejadian umum yang tercatat tanpa memperhitungkan hal khusus yang mungkin akan memperbesar pengaruh setempat. Perencana mempunyai tanggung jawab untuk mengidentifikasi kejadian khusus setempat dan harus memperhitungkannya dalam perencanaan.

1. Beban angin

Apabila suatu kendaraan sedang berada di atas jembatan, beban garis merata tambahan arah horizontal harus diterapkan pada permukaan lantai seperti diberikan dengan rumus:

$$T_{ew} = 0,0012 \times C_w \times (V_w)^2 \quad [\text{kN}] \quad (2.20)$$

Dimana:

V_w = Kecepatan angin rencana (m/dt) untuk keadaan batas yang ditinjau.

C_w = Koefisien seret yang besarnya tergantung dari perbandingan dari lebar total jembatan dengan tinggi bangunan atas termasuk tinggi bagian sandaran yang masif (b/d).

Tabel 2.3: Kecepatan angin rencana.

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

Tabel 2.4: Koefisien seret C_w .

Tipe jembatan	C_w
$b/d = 1,0$	2,1
$b/d = 1,0$	1,5
$b/d = 1,0$	1,25
Bangunan atas rangka	1,2

2. Beban gempa

Gaya gempa vertikal pada balok dihitung dengan menggunakan percepatan vertical ke bawah sebesar 0,1 g dengan:

$$g = 9,8 \text{ m/d}^2 \quad (2.21)$$

Gaya gempa vertikal rencana

$$T_{EQ} = 0,10 \times W_T \quad (2.22)$$

W_T = Berat total struktur yang berupa berat sendiri dan beban tambahan.

Untuk jembatan besar, rumit dan pebling mungkin diperlukan analisa dinamis. Beban rencana gempa minimum diperoleh dari rumus berikut:

$$T_{EQ} = K_H/W_T \quad (2.23)$$

Dimana:

$$K_H = C \times S \quad (2.24)$$

Dengan pengertian:

T_{EQ} = Gaya geser total dalam arah yang ditinjau (kN)

K_H = Koefisien beban gempa horizontal

C = Koefisien geser dasar waktu dan kondisi setempat yang sesuai

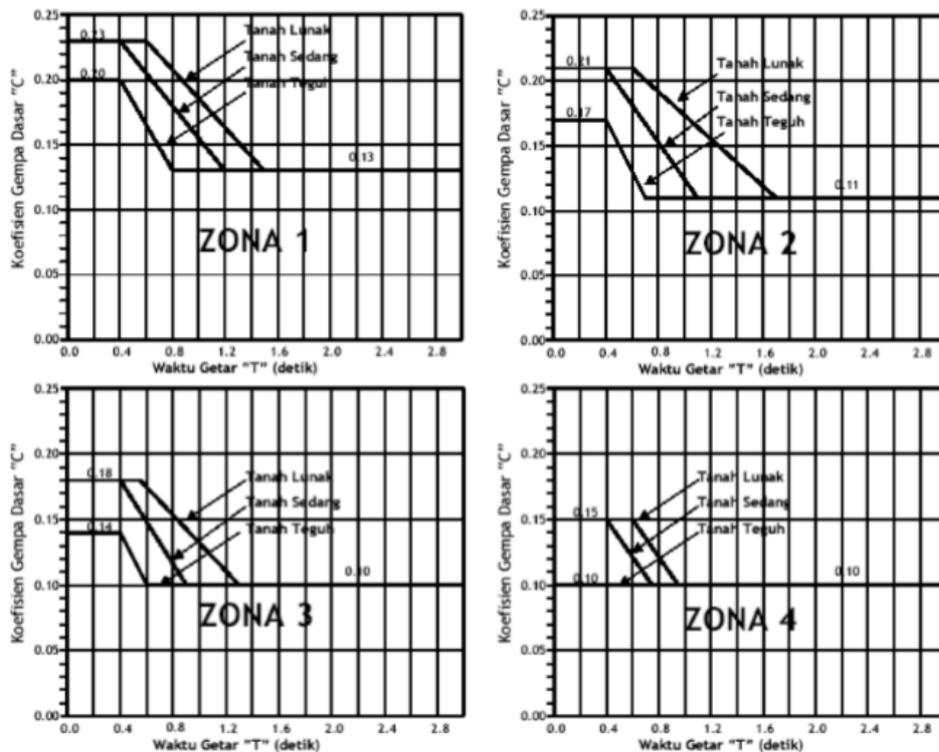
I = Faktor kepentingan

S = Faktor tipe bangunan

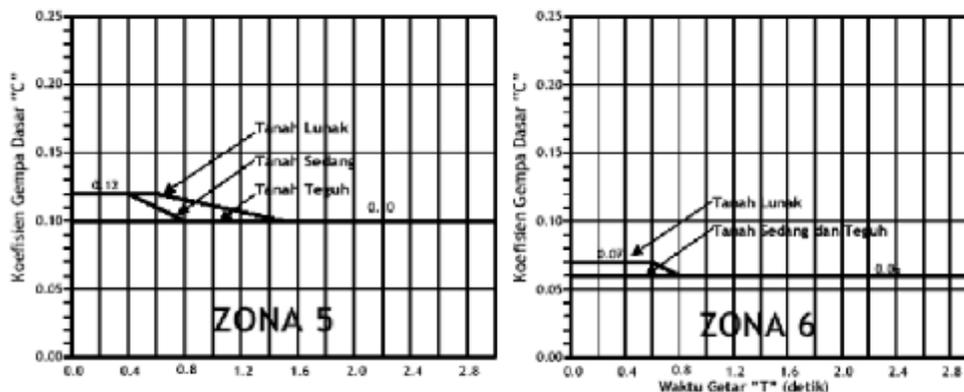
W_r = Berat total nominal bangunan yang mempengaruhi percepatan gempa, diambil sebagai beban mati ditambah beban mati tambahan (kN)

3. Koefisien geser dasar (C)

Koefisien geser dasar diperoleh dari Gambar 2.16 dan sesuai daerah gempa, fleksibilitas tanah di bawah permukaan dicantumkan berupa garis dan waktu getar bangunan gambar untuk menentukan pembagian daerah.



Gambar 2.15: Koefisien geser dasar (C) Plastis untuk analisa statis (RSNI T-02-2005).



Gambar 2.15: Lanjutan

Kondisi tanah di bawah permukaan didefinisikan sebagai teguh, sedang dan lunak sesuai kriteria yang tercantum pada Tabel 2.24. Untuk jelasnya, perubahan titik pada garis dalam Gambar 2.39 diberikan dalam Tabel 2.24. Waktu dasar getaran jembatan yang digunakan menghitung geser dasar harus dihitung dari analisa seluruh elemen bangunan yang memberi kekakuan dan fleksibilitas dari sistem fondasi. Untuk bangunan dengan satu derajat kebebasan, rumus berikut bisa digunakan:

$$T = 2 \sqrt{\frac{W_{TP}}{g - K_p}} \quad (2.25)$$

Dimana:

T = waktu getar dalam detik untuk free body dengan satu derajat kebebasan

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

W_{TP} = berat total nominal bangunan atas termasuk beban mati tambahan ditambah setengah berat dari pilar (kN)

K_p = kekakuan gabungan sebagai gaya horizontal yang diperlukan untuk menimbulkan satu satuan lendutan pada bagian atas pilar (kN/m)

Tabel 2.5: Faktor kepentingan (RSNI T-02-2005).

1	Jembatan memuat lebih dari 2000 kendaraan/hari, jembatan pada jalan raya utama atau arteri dan jembatan dimana tidak ada rute alternative.	1,2
2	Seluruh jembatan permanen lain, dimana ada rute alternative, tidak termasuk jembatan direncanakan pembebanan lalu lintas dikurangi.	1,0
3	Jembatan sementara (missal: Bailey) dan jembatan yang direncanakan untuk pembebanan lalu lintas yang dikurangi sesuai dengan pasal 6.5.	0,8

Tabel 2.6: Faktor Tipe Bangunan (RSNI T-02-2005).

Tipe Jembatan ⁽¹⁾	Jembatan dengan daerah sendi beton bertulang atau baja	Jembatan dengan daerah sendi beton prategang	
		Prategang Parsial ⁽²⁾	Prategang Penuh ⁽²⁾
Tipe A ⁽³⁾	1,0 F	1,15 F	1,3 F
Tipe B ⁽³⁾	1,0 F	1,15 F	1,3 F
Tipe C ⁽³⁾	3,0	3,0	3,0

Catatan (1) Jembatan mungkin mempunyai tipe bangunan yang berbeda pada arah melintang dan memanjang, dan tipe bangunan yang sesuai harus digunakan untuk masing-masing arah.

Catatan (2) Yang dimaksud dalam tabel ini, beton prategang parsial mempunyai prapenegangan yang cukup untuk kira-kira mengimbangi pengaruh dari beban tetap rencana dan selebihnya diimbangi oleh tulangan biasa. Beton prategang penuh mempunyai prapenegangan yang cukup untuk mengimbangi pengaruh beban total rencana.

Catatan (3) $F = \text{Faktor perangkaan} = 1,25 - 0,025 n$; $F \geq 1,00$ $n = \text{jumlah sendi plastis yang menahan deformasi arah lateral pada masing bagian monolit dari jembatan yang berdiri sendiri (misalnya: bagian yang dipisahkan oleh sambungan siar muai yang memberikan keleluasan untuk bergerak dalam arah lateral secara sendirisendiri)}$.

Catatan (4)
Tipe A: jembatan daktail (bangunan atas bersatu dengan bangunan bawah)
Tipe B: jembatan daktail (bangunan atas terpisah dengan bangunan bawah)
Tipe C: jembatan tidak daktail (tanpa sendi plastis)

2.4. Beton Prategang

2.4.1. Konsep Dasar

Beton adalah bahan yang mempunyai kekuatan tekan yang tinggi, tetapi kekuatan tariknya relative rendah. Kuat tariknya bervariasi dari 8 % sampai 14 % dari kuat tekannya (Nawy, 2001). Sedangkan baja adalah suatu material yang mempunyai kekuatan tarik yang tinggi. Dengan mengkombinasikan beton dan baja sebagai bahan struktur maka tegangan tekan akan dipikulkan pada beton sedangkan tegangan tarik akan dipikulkan pada baja.

Pada struktur dengan bentang yang panjang, struktur bertulang biasa tidak cukup untuk menahan tegangan lentur sehingga terjadi retak retak didaerah yang mempunyai tegangan lentur, geser dan punter yang tinggi. Untuk mengurangi atau mencegah berkembangnya retak tersebut, gaya konsentris atau eksentris diberikan dalam arah longitudinal elemen struktural. Gaya ini mencegah berkembangnya retak dengan cara mengeliminasi atau sangat mengurangi tegangan tarik di bagian

tumpuan dan daerah kritis pada kondisi beban kerja sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur, geser, dan torsional penampang tersebut. Penampang dapat berperilaku elastis, dan hampir semua kapasitas beton dalam memikul tekan dapat secara efektif dimanfaatkan di seluruh tinggi penampang beton pada saat semua beban bekerja di struktur tersebut (Raju,1998).

Gaya longitudinal yang diterapkan tersebut di atas disebut gaya prategang, yaitu gaya tekan yang memberikan prategang pada penampang di sepanjang bentangsuatu elemen struktural sebelum bekerjanya beban mati dan beban hidup transversal atau beban hidup horizontal transien. Gaya prategang ini berupa tendon yangdiberikan tegangan awal sebelum memikul beban kerjanya, yang berfungsi mengurangi atau menghilangkan tegangan tarik pada saat beton mengalami beban kerja, menggantikan tulangan tarik pada struktur beton bertulang biasa.

Pada beton bertulang biasa, gaya tarik yang berasal dari momen lentur ditahan oleh lekatan yang terjadi antara tulangan dan beton. Akan tetapi, tulangan di dalam komponen struktur beton bertulang tidak memberikan gaya dari dirinya pada komponen struktur tersebut, suatu hal yang berlawanan dengan aksi baja (*tendon*) prategang yang menghasilkan gaya dari dirinya sehingga memungkinkan pemulihan retak dan defleksi akibat momen lentur tersebut. Pemberian gaya prategang berupa tendon, guna mengurangi atau menghilangkan tegangan tarik, ini yang dikenal sebagai beton prategang.

Beton prategang adalah material yang sangat banyak digunakan dalam kontruksi. Beton prategang pada dasarnya adalah beton di mana tegangan-tegangan internal dengan besar serta distribusi yang sesuai diberikan sedemikian rupa sehingga tegangan-tegangan yang diakibatkan oleh beban-beban luar dilawan sampai suatu tingkat yang diinginkan. Prategang meliputi tambahan gaya tekan pada struktur untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan gaya tarik internal dan dalam hal iniretak pada beton dapat dihilangkan. Pada beton bertulang, prategang pada umumnya diberikan dengan menarik baja tulangan. Gaya tekan disebabkan oleh reaksi baja tulangan yang ditarik, mengakibatkan berkurangnya retak, elemen beton prategang akan jauh lebih kokoh dari elemen beton bertulang biasa. Prategangan juga menyebabkan gaya dalam yang berlawanan dengan gaya luar dan mengurangi atau bahkan menghilangkan lendutan secara signifikan pada struktur.

Beton yang digunakan dalam beton prategang adalah mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi dengan nilai f'_c minimal 30 MPa, modulus elastis yang tinggi dan mengalami rangkai ultimate yang lebih kecil, yang menghasilkan kehilangan prategang yang lebih kecil pada baja. Kuat tekan yang tinggi ini diperlukan untuk menahan tegangan tekan pada serat tertekan, pengangkutan tendon, mencegah terjadinya keretakan. Pemakaian beton berkekuatan tinggi dapat memperkecil dimensi penampang melintang unsur-unsur struktural beton prategang. Dengan berkurangnya berat mati material, maka secara teknis maupun ekonomis bentang yang lebih panjang dapat dilakukan.

Keuntungan penggunaan beton prategang (Andri, 2008) adalah:

1. Dapat memikul beban lentur yang lebih besar dari beton bertulang.
2. Dapat dipakai pada bentang yang lebih panjang dengan mengatur defleksinya.
3. Ketahanan geser dan puntirnya bertambah dengan adanya penegangan.
4. Dapat dipakai pada rekayasa konstruksi tertentu, misalnya pada konstruksi jembatan segmental.
5. Berbagai kelebihan lain pada penggunaan struktur khusus, seperti struktur pelat dan cangkang, struktur tangki, struktur pracetak, dan lain-lain.
6. Pada penampang yang diberi penegangan, tegangan tarik dapat dieliminasi karena besarnya gaya tekan disesuaikan dengan beban yang akan diterima.

Kekurangan struktur beton prategang relatif lebih sedikit dibandingkan berbagai keuntungannya, diantaranya:

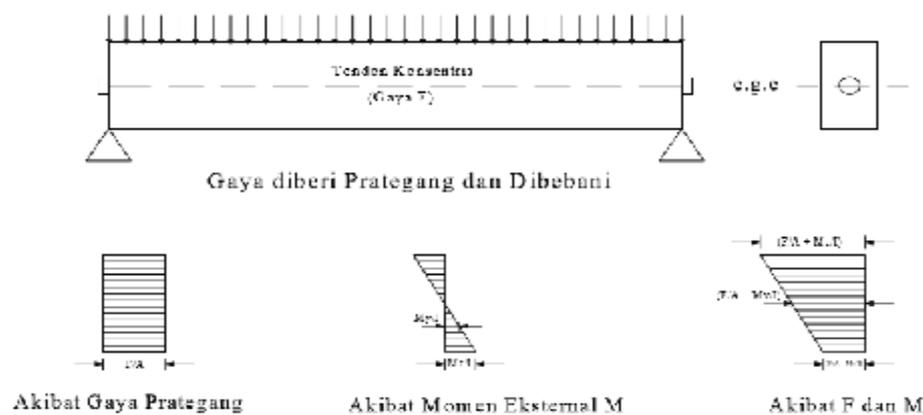
1. Memerlukan peralatan khusus seperti *tendon*, ankur, mesin penarik kabel, dan lain-lain.
2. Memerlukan keahlian khusus baik didalam perencanaan maupun pelaksanaannya.

Ada tiga konsep yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Hal ini dapat diterangkan sebagai berikut:

1. Konsep pertama adalah sistem prategang untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis. Konsep ini memperlakukan beton sebagai bahan yang elastis. Ini merupakan sebuah pemikiran dari (Eugene Freyssnet) yang memvisualisasikan beton prategang yang pada dasarnya adalah beton dari bahan yang getas menjadi bahan yang elastis dengan memberikan tekanan

(desakan) terlebih dahulu (pratekan) pada bahan tersebut. Beban yang tidak mampu menahan tarikan dana kuat memikul tekanan (umumnya dengan baja mutu tinggi yang ditarik) sedemikian sehingga beton yang getas dapat memikul tegangan tarik. Dari konsep inilah lahir kriteria “tidak ada tegangan tarik” pada beton. Umumnya telah diketahui bahwa jika tidak ada tegangan tarik pada beton, berarti tidak akan terjadi retak, dan beton tidak merupakan bahan yang getas lagi melainkan bahan yang elastis.

Dalam bentuk yang sederhana, ditinjau sebuah balok persegi panjang yang diberi gaya prategang oleh sebuah tendon melalui sumbu yang melalui titik berat dan dibebani oleh gaya eksternal.



Gambar 2.16: Distribusi Tegangan Sepanjang Penampang Beton Prategang konsentris (Lin & Burns, 1981).

Gaya partegang F pda tendon menghasilkan gaya tekan F yang sama pada beton yang juga bekerja pada titik berat tendon. Akibatnya gaya prategang tekan secara merata sebesar:

$$f = \frac{F}{A} \tag{2.1}$$

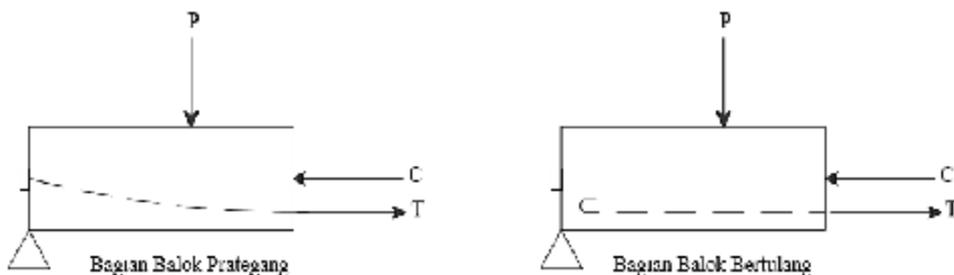
Dan akan timbul pada penampang seluas A. jika M adalah momen eksternal pada penampang akibat beban dan berat sendiri balok, maka tegangan pada setiap titik sepanjang penampang akibat M adalah:

$$f = \frac{My}{I} \quad (2.2)$$

Dimana y adalah jarak dari sumbu yang melalui titik berat dan I adalah momen inersia penampang. Jadi distribusi tegangan yang dihasilkan adalah:

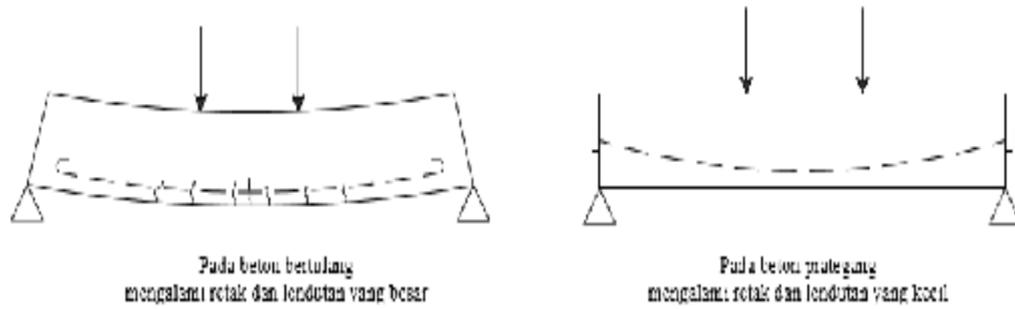
$$f = \frac{F}{A} + \frac{My}{I} \quad (2.3)$$

2. Konsep kedua adalah sistem prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton. Konsep ini mempertimbangkan beton prategang sebagai kombinasi (gabungan) dari baja dan beton, seperti pada beton bertulang, dimana baja menahan tarikan dan beton menahan teknan. Dengan demikian kedua bahan membentuk kopel penahan untuk melawan momen eksternal. Hal ini merupakan konsep yang mudah. Dengan beton bertulang, dimana baja menahan gaya tarik dan beton menahan gaya tekan, dan kedua gaya membentuk momen kopel dengan momen diantaranya.



Gambar 2.17: Momen penahanan Internal pada beton prategang dan beton bertulang (Lin & Burns, 1981).

Pada beton prategang, baja mutu tinggi dipakai dengan cara menariknya sebelum kekuatannya dimanfaatkan sepenuhnya. Jika beton mutu tinggi ditanamkan pada beton, seperti pada beton bertulang biasa, beton sekitarnya akan mengalami retak sebelum seluruh kekuatan baja digunakan

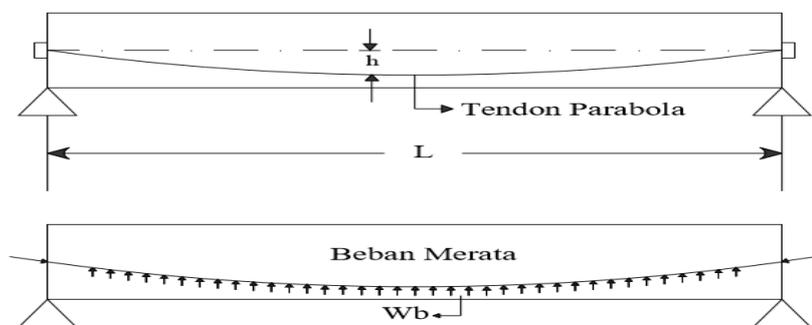


Gambar 2.18: Balok beton menggunakan Baja Mutu Tinggi (Lin & Burns, 1981).

3. Konsep ketiga adalah Sistem Prategang untuk Mencapai Keseimbangan Beban. Konsep ini terutama menggunakan prategang sebagai suatu usaha untuk membuat seimbang gaya-gaya pada sebuah batang.

Pada keseluruhan desain struktur beton prategang, pengaruh dari prategang dipandang sebagai keseimbangan berat sendiri sehingga batang yang mengalami lenturan seperti pelat (*slab*), balok, dan gelagar (*girder*) tidak akan mengalami tegangan lentur pada kondisi pembebanan yang terjadi. Ini memungkinkan transformasi dari batan lentur menjadi batang yang mengalami tegangan langsung dan sangat menyederhanakan persoalan baik didalam desain maupun analisis dan struktur yang rumit.

Penerapan dari konsep ini menganggap beton diambil sebagai benda bebas dan menggantikan tendon dengan gaya-gaya yang bekerja pada beton sepanjang bentang. Sebagai contoh, sebuah balok prategang diatas dua tumpuan (*simple beam*).



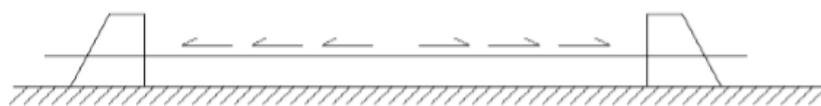
Gambar 2.19: Balok prategang dengan Tendon Parabola (Lin & Burns, 1981).

2.4.2. Sistem Prategang dan Pengangkeran

Untuk memberikan tekanan pada beton prategang dilakukan sebelum atau setelah beton dicor/dicetak. Kedua kondisi tersebut membedakan system prategang, yaitu *Pre-tension* (pratarik) dan *Post-tension* (pasca tarik).

2.4.2.1. Pratarik

Metode ini digunakan untuk beton-beton pracetak dan biasanya digunakan untuk konstruksi-konstruksi kecil. Pada cara ini, tendon pertama – tama ditarik dan diangkur pada abutment tetap. Beton dicor pada cetakan yang sudah disediakan dengan melingkupi tendon yang sudah ditarik tersebut. Jika kekuatan beton sudah mencapai yang disyaratkan maka tendon dipotong dan angkurnya dilepas. Pada saat baja yang ditarik berusaha untuk berkontraksi, beton akan tertekan. Pada cara ini tidak digunakan selongsong beton. Proses pengerjaan beton prategang dengan system pratarik dapat dilihat dari gambar dibawah ini :



Kabel tendon ditarik diantara kedua angkur



Kabel tendon ditahan angkur, sementara beton dicor

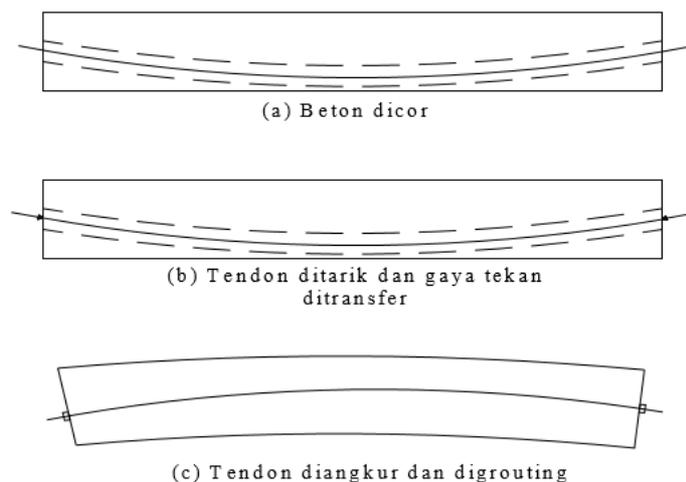


Kabel tendon dilepaskan dan gaya tekan berpindah pada beton
Gambar 2.20: Proses Pengerjaan Beton Pratarik (*Pre-tensioning*)
(Andri, 2008).

2.4.2.2. Pasca Tarik

Adapun metode dalam pelaksanaan pengerjaan beton pasca tarik (*Post-tensioning*) adalah sebagai berikut:

- a. Selongsong kabel *tendon* dimasukkan dengan posisi yang benar pada cetakan beton beserta atau tanpa *tendon* dengan salah satu ujungnya diberi angkur hidup dan ujung lainnya angkur mati atau kedua ujungnya dipasang angkur hidup. Beton dicor dan dibiarkan mengeras hingga mencapai umur yang mencukupi. Selanjutnya, dongkrak hidrolik dipasang pada angkur hidup dan kabel *tendon* ditarik hingga mencapai tegangan atau gaya yang direncanakan. Untuk mencegah kabel *tendon* kehilangan tegangan akibat slip pada ujung angkur terdapat baji. Gaya tarik akan berpindah pada beton sebagai gaya tekan internal akibat reaksi angkur.



Gambar 2.21: Proses Pengerjaan Beton Pasca tarik (*Post-tensioning*) (Andri, 2008).

2.4.3. Material Beton Prategang

2.4.3.1. Beton

Beton adalah campuran semen, air dan agregat dan bahan aditif untuk keperluan khusus. Setelah beberapa jam dicampur, bahan-bahan tersebut akan langsung mengeras sesuai bentuk pada waktu basah. Kekuatan beton ditentukan oleh

kekuatan oleh kuata tekan karakteristik pada usia 28 hari. Kuat tekan karakteristik adalah tegangan yang melampaui 95 % dari pengukuran kuat tekan *unaksial* yang diambil dari tes penekanan standar, yaitu dengan kubus ukuran 150 x 150 mm, atau silinder dengan diameter 150 mm dengan tinggi 300 mm. Pengukuran kekuatan dengan kubus adalah lebih tinggi daripada dengan silinder.

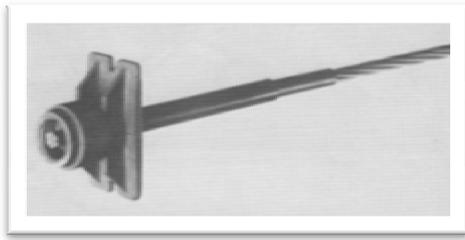
Beton yang digunakan dalam beton prategang adalah mempunyai kuat tekan yang cukup tinggi dengan nilai f'_c min 30 MPa, modulus elastis yang tinggi dan mengalami rangkai ultimit yang lebih kecil, yang menghasilkan kehilangan prategang yang lebih kecil pada baja. Kuat tekan yang tinggi ini diperlukan untuk menahan tegangan tekan pada serat tertekan, pengangkutan tendon, mencegah terjadinya keretakan, mempunyai modulus elastisitas yang tinggi dan mengalami rangkai lebih kecil (Andri, 2008). Pemakaian beton berkekuatan tinggi dapat memperkecil dimensi penampang melintang unsur-unsur struktural beton prategang. Dengan berkurangnya berat mati material, maka secara teknis maupun ekonomis bentang yang lebih panjang dapat dilakukan.

Menurut RSNI T-12-2004, tegangan ijin beton pada kondisi transfer prategang tidak boleh melampaui nilai $0,60 f_{ci}$, dimana f_{ci} adalah kuat tekan beton yang direncanakan pada umur saat dibebani atau dilakukan transfer gaya prategang. Sedangkan untuk tegangan ijin tarik pada kondisi transfer tidak boleh melebihi nilai $0,25 \sqrt{f_{ci}}$.

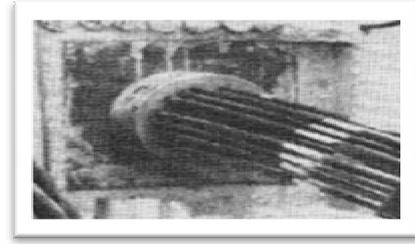
2.4.3.2. Baja Tendon

Baja (tendon) yang dipakai untuk beton prategang dalam prakteknya ada tiga macam, yaitu:

1. Kawat tunggal (*wires*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan system pratarik (*pre-tension*).
2. Kawat untai (*strand*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan system pascatarik (*post-tension*).
3. Kawat batangan (*bars*), biasanya digunakan untuk baja prategang pada beton prategang dengan system pratarik (*pre-tension*).



a. Kawat tunggal (*Wires*)



b. Untaian Kawat (*Stand*)



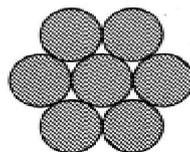
c. Kawat Batangan (*Bars*)

Gambar 2.22: Jenis-jenis Baja yang dipakai untuk Beton Prategang (Hurst, 1998).

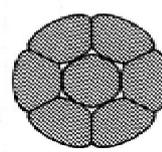
Kawat tunggal yang dipakai untuk beton prategang adalah yang sesuai dengan spesifikasi seperti ASTM A 421. Ukuran dari kawat tunggal bervariasi dengan diameter antara 3–8 mm, dengan tegangan tarik (f_p) antara 1500–1700 Mpa dengan modulus elastisitas $E_p = 200 \times 10^3$ Mpa.

Untaian kawat (*strand*) banyak digunakan untuk beton prategang dengan system pasca tarik. Untaian kawat yang dipakai harus memenuhi syarat seperti yang terdapat ASTM A 416 untaian kawat yang banyak digunakan adalah untaian tujuh kawat dengan kualitas: Grade 250 dan Grade 270.

Untuk memaksimalkan luas baja *strands* 7 kawat untuk suatu diameter nominal, kawat standar dapat dibentuk menjadi strands yang dipadatkan seperti pada Gambar 2.9. Standar ASTM yang disyaratkan masing-masing tercantum pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.



a. Penampang strand standar.



b. Penampang strand yang dipadatkan

Gambar 2.23: *Strands* Prategang 7 Kawat Standard dan Dipadatkan (Nawy, 1998).

Tabel 2.7: Kabel-kabel untuk beton prategang (*Post-tensioning Institute*).

Kuat tarik minimum (pci)			Tegangan minimum pada ekslensi 1% (pci)	
Diameter Nominal (in)	Tipe BA	Tipe WA	Tipe BA	Tipe WA
0,192		250.000		212.500
0,196	240.000	250.000	204.000	212.500
0,250	240.000	250.000	204.000	204.000
0,276	235.000	250.000	199.750	199.750

Tabel 2.8: *Strand* Standar Tujuh kawat Untuk Beton Prategang (*Standar specification of ASTM A-416*).

Strand Designation No	Nominal Diameter of Strand, mm (in)	Minimum Breaking Strength of Strand, kN (lbf)	Nominal Steel Area of Strand, mm ² (in ²)	Nominal Mass of Strand, g/m (lb/1000 ft)
Grade 1725 (250)				
6	6,4 (0,250)	40,0 (9000)	23,1 (0,036)	182 (122)
8	7,9 (0,313)	64,5 (14500)	37,4 (0,058)	294 (197)
9	9,5 (0,375)	89,0 (20000)	51,6 (0,080)	405 (272)
11	11,1 (0,438)	120,1 (27000)	69,7 (0,108)	548 (367)
13	12,7 (0,500)	160,1 (36000)	92,9 (0,144)	730 (490)
15	15,2 (0,600)	240,2 (54000)	139,4 (0,216)	1094 (737)
Grade 1860 (270)				
9	9,5 (0,375)	102,3 (23000)	54,8 (0,085)	432 (290)
11	11,1 (0,438)	137,9 (31000)	74,2 (0,115)	582 (390)
13	12,7 (0,500)	183,7 (41300)	98,7 (0,153)	775 (520)
15	15,2 (0,600)	260,7 (58600)	140,0 (0,217)	1102 (740)

Contoh material material dan peralatan untuk sistem prategang yang ada di pasaran atau di lapangan:

1. *Dywidag*

a. Kawat batangan atau *bars dywidag* menyediakan 2 jenis kawat batangan yaitu:

1. *Thread bars*
2. *Plain bars*



a. Thears bars



b. Plain bars

Gambar 2.24: Contoh kawat batangan dari Dywidag (Dywidag).

Tabel 2.9: Data teknis kawat batangan dari dywidag (Dywidag).

Designation	THREAD BAR [€]							Plain Bar	
	-	-	26 WR	32 WR	36 WR	40 WR	47 WR	32 WS	36 WS
Nominal diameter	d_s	mm	26,5	32	36	40	47	32	36
Cross section area	S_n	mm ²	552	804	1018	1257	1735	804	1018
Nominal mass per metre	M	Kg/m	4,48 ¹⁾	6,53 ¹⁾	8,27 ¹⁾	10,21 ¹⁾	14,10 ¹⁾	6,31	7,99
Pitch	c	mm	13	16	18	20	21	3,0	3,0
Characteristic breaking load	F_m	kN	580	845	1070	1320	1820	845	1070
Max initial stressing force $P_{m0,max}=S_{nx}0,8$ $x f_{p,k}$		kN	464	676	856	1056	1456	676	856
Max overstressing force $P_{0,max}=$ $S_{nx}0,95x f_{p0,1k}$		kN	499	722	912	1130	1567	722	912

Contoh aplikasi pemakaian kawat batangan di lapangan:

Kawat batangan *prestress* dapat digunakan di struktur baru dan untuk memperkuat struktur yang ada, seperti sebagai *longitudinal* atau *transversal tendon*, sebagai penguatan geser, sebagai koneksi elemen beton pracetak.

Contohnya kawat batangan *prestress* dapat digunakan sebagai *tendon eksternal* dan sebagai koneksi antar segmen pada jembatan *box girder* yang menggunakan *system kantilever* seperti Gambar 2.11.



Gambar 2.25: Contoh pemakaian kawat batangan *prestress* (*Dywidag*).

b. System Pengukuran

Tabel 2.10: Contoh pengukuran dari *type Dywidag* (*Dywidag*).

Type	Fungsi	Ultimate load (kN)
Plate Anchorage Type ED	Angkur mati dan ankur hidup	Dari 721 sampai 1395
Multiplane Anchorage MA	Angkur mati dan ankur hidup	Dari 1201 sampai 10323
Coupler R	Sambungan	Dari 1201 sampai 10323
Coupler D	Angkur mati dan ankur hidup	Dari 721 sampai 6138
Bond Head Anchorage ZF/ZR	Angkur mati dan ankur hidup	Dari 230 sampai 3348
Coupler M/ME (Floating Anchorage Block)	Angkur mati dan ankur hidup	Dari 721 sampai 2511
Coupler P	Sambungan	Dari 1201 sampai 10323
Flat Anchorage FA	Angkur mati dan ankur hidup	Dari 721 sampai 1116



a. Plate anchorage type ED



b. Multiplane anchorage MA



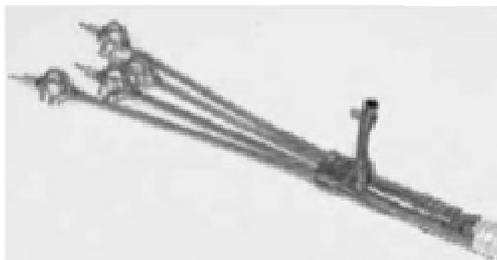
c. Coupler R



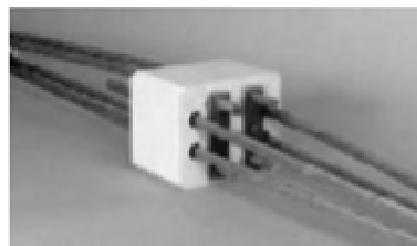
d. Plate anchorage SD



e. Coupler D



f. Bond head anchorage ZF/ZR

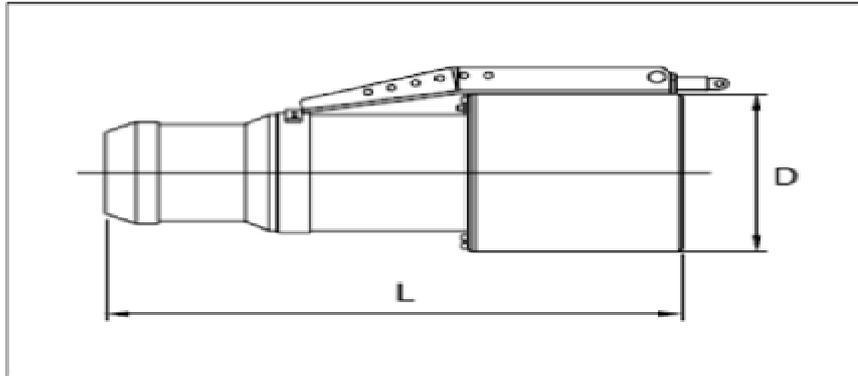


g. Coupler M/ME

Gambar 2.26: Sistem pengankuran *system Dywidag* (*Dywidag*).

c. Sistem Pendongkrak

Jenis-jenis dongkrak hidrolik yang dimiliki *Dywidag*:



Gambar 2.27: Dongkrak hidrolik *system Dywidag (Dywidag)*.

Tabel 2.11: Data-data teknis dongkrak tersebut:

Jack type ^{f)}	Length L (mm)	Diameter D (mm)	Stroke (mm)	Piston area (cm ²)	Capacity ²⁾	Weight (kg)
SM 240	842	96	200	47,13	240	19
HoZ 950/100	621	203	100	161,98	972	65
HoZ 1.700/150	803	260	150	298,45	1.745	160
HoZ 3.000/250	1.137	385	250	508,94	3.054	400
HoZ 5.400/250	1.271	482	250	894,57	5.367	600
6.800	1.150	560	300	1237,01	6.803	1.185
9.750	1.170	680	300	1772,45	9.748	1.770

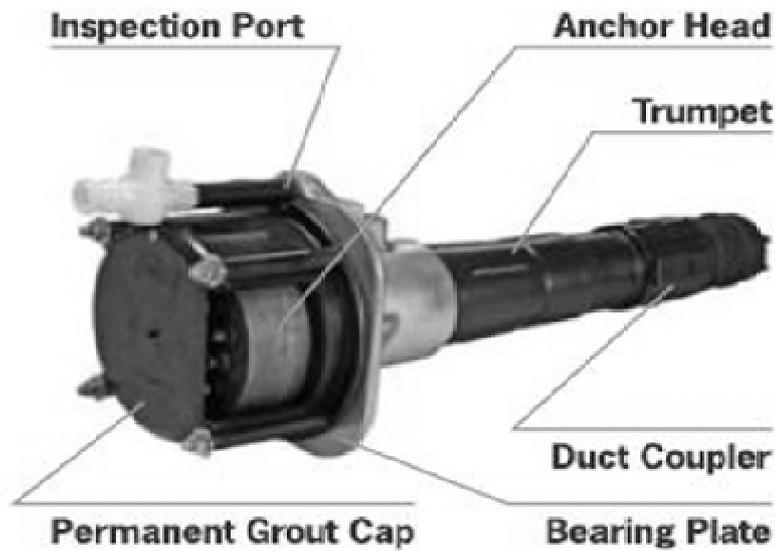
2. VSL

a. Sistem pengankuran

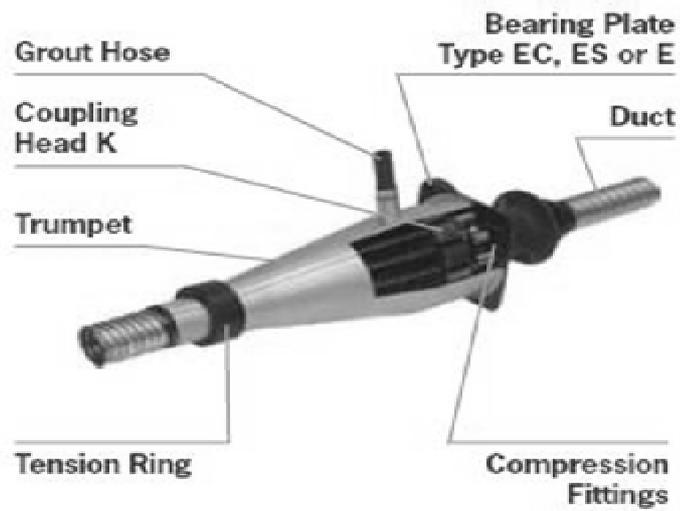
Beberapa jenis ankur yang dimiliki VSL adalah sebagai berikut:

1. *Stressing Anchorage*
2. *Dead-End Anchorage*

3. Type Z Intermediate Anchorage

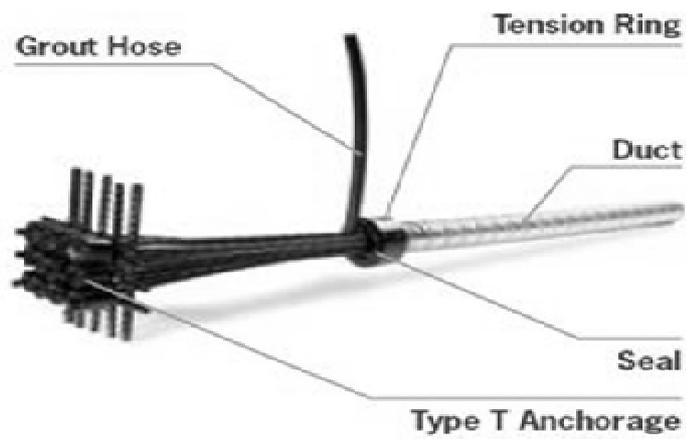


a. Type ECI Stressing Anchorage

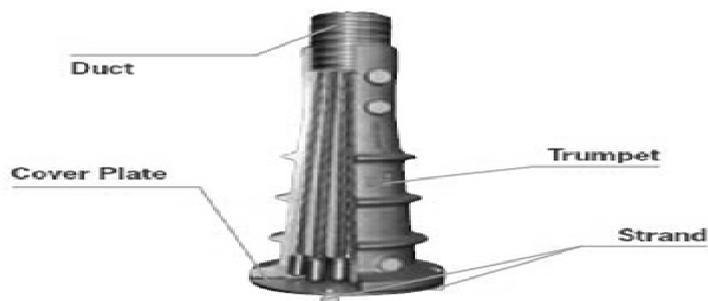


b. Type E Stressing Anchorage

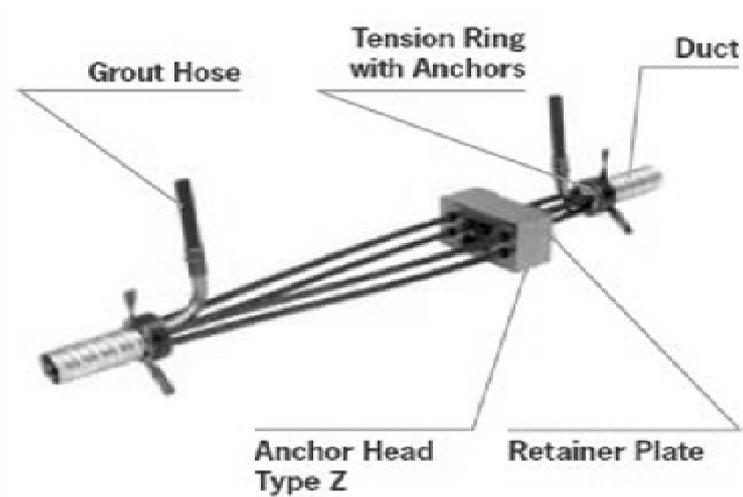
Gambar 2.28: System pengangkutan System VSL (VSL).



c. *Type T Dead-End Anchorage*



d. *Type AF Dead-End Anchorage*



e. *Type Z Intermediate Anchorage*

Gambar 2.14: Lanjutan.

b. Sistem pendongkrak

Jenis-jenis dongkrak hidrolik yang dimiliki VSL:



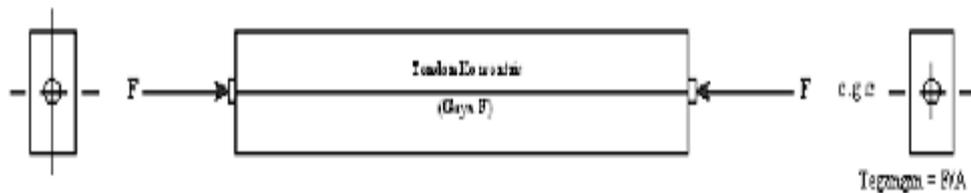
a. Type I (ZPE-23FJ) b. Type II (ZPE-19) c. Type III (ZPE-500)

Gambar 2.29: Dongkrak hidrolik system VSL (VSL).

2.5. Analisa Prategang

Tegangan yang disebabkan oleh prategang umumnya merupakan tegangan kombinasi yang disebabkan oleh beban langsung dan lenturan yang dihasilkan oleh beban yang ditempatkan secara eksentris.

a. *Tendon* Konsentris

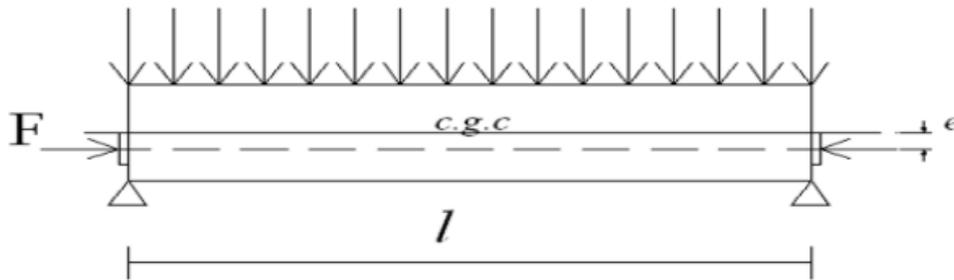


Gambar 2.16: Prategang konsentris (Raju,2008).

Gambar di atas menunjukkan sebuah beton prategang tanpa eksentrisitas, tendon berada pada garis berat beton (*central gravity of concrete, c.g.c.*). Prategang seragam beton = F/A yang berupa tekan pada seluruh tinggi balok. Pada umumnya beban-beban yang dipakai dan beban mati balok menimbulkan tegangan tarik terhadap bidang bagian bawah dan ini diimbangi lebih efektif dengan memakai *tendon* eksentris.

b. Tendon Eksentris

Sebuah balok yang mengalami suatu gaya prategang eksentris sebesar (P) yang ditempatkan dengan eksentrisitas (e). *Tendon* ditempatkan secara eksentris terhadap titik berat penampang beton. Eksentrisitas *tendon* akan menambah kemampuan untuk memikul beban *eksternal*.



Gambar 2.30: Prategang Eksentris (Raju,1998).

2.5.1. Kehilangan Prategang

Gaya prategang akan mengalami pengurangan/reduksi saat *transfer* (jangka pendek) atau saat *service* (jangka panjang). Kehilangan prategang saat transfer terjadi sesaat setelah penarikan tendon, sedangkan kehilangan saat *service* terjadi perlahan-lahan pada saat umur pelayanan dan arena pengaruh waktu.

1. Kehilangan gaya prategang langsung yaitu kehilangan gaya prategang yang terjadi segera setelah peralihan gaya prategang (waktu jangka pendek) yang meliputi:
 - Perpendekan elastic
 - Gesekan kabel
 - Slip ankur
2. Kehilangan prategang berdasarkan fungsi waktu yang kehilangan gaya prategang yang tergantung pada waktu (jangka waktu tertentu) yang meliputi:
 - Rangkak beton (*creep*)
 - Susut beton (*shrinkage*)
 - Relaksasi baja (*relaxation*)

2.5.1.1. Kehilangan Gaya Prategang Langsung

a. Kehilangan gaya prategang akibat pendekatan elastis (ES)

Pada struktur yang menggunakan kabel tunggal, tidak ada kehilangan gaya prategang akibat perpendekan beton, karena gaya pada kabel diukur setelah perpendekan terjadi. Pada penampang yang menggunakan lebih dari satu kabel, kehilangan gaya prategang ditentukan oleh kabel yang pertama ditarik dan memakai harga setengahnya untuk mendapatkan rata-rata semua kabel. Kehilangan gaya prategang pada struktur pasca tarik dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$ES = \Delta f_c = \frac{n P_i}{A_c} \quad (2.4)$$

Dimana:

F_c = tegangan pada penampang

P_i = gaya prategang awal

b. Kehilangan gaya prategang akibat gesekan kabel (Psi)

Pada struktur beton prategang dengan tendon yang melengkung diketahui adanya gesekan pada system penarik (*jacking*) dan ankur sehingga tegangan yang ada pada tendon lebih kecil daripada yang terdapat pada alat baca tekanan (*pressure gauge*). Kehilangan tegangan akibat gesekan pada tendon sangat dipengaruhi oleh pergerakan dari selongsong (*wooble*). Untuk itu digunakan koefisien *wooble*, K , dan koefisien kelengkungan μ .

Menurut SNI 03-2847-2002 kehilangan tegangan akibat friksi pada tendon pasca tarik harus dihitung dengan rumus:

$$P_s = P_o (1 - K \cdot Lx + \mu \alpha) \quad (2.5)$$

Bila $(K \cdot Lx + \mu \alpha)$ tidak lebih besar dari 0,3 maka kehilangan tegangan harus akibat friksi harus dihitung dengan rumus:

$$P_s = P_o (1 + K \cdot Lx + \mu \alpha) \quad (2.6)$$

Dimana:

P_o = gaya prestress yang terjadi akibat jacking

K = Koefisien Wooble

L_x = panjang kabel yang ditinjau

μ = koefisien friksi

α = perubahan sudut akibat pengaruh kelengkungan

c. Kehilangan gaya prategang akibat slip ankur (ANC)

Slip pada ankur terjadi sewaktu kawat dilepaskan dari mesin penarik dan ditahan baji pada ankur. Panjang atau besarnya slip tergantung pada tipe baji dan tegangan pada kawat tendon. Harga rata rata panjang slip akibat pengankuran adalah 2,5 mm. Untuk menentukan kehilangan tegangan akibat slip dapat digunakan persamaan berikut:

$$ANC = \Delta L = \frac{f_c}{E_s} L \quad (2.7)$$

Dimana:

f_c = tegangan pada penampang

E_s = modulus elastisitas baja tendon

2.5.1.2. Kehilangan Gaya Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu

a. Kehilangan gaya prategang akibat rangkai beton (CR)

Rangkai pada beton terjadi karena deformasi akibat adanya tegangan pada beton sebagai satu fungsi waktu. Pada struktur beton prategang, rangkai mengakibatkan berkurangnya tegangan pada penampang. Untuk struktur dengan lekatan yang baik antara tendon dan beton (*bonded members*), kehilangan tegangan akibat rangkai dapat diperhitungkan dengan persamaan berikut:

$$CR = K_{cr} \frac{E_s}{E_c} (f_{ci} - f_{cd}) \quad (2.8)$$

Dimana:

K_{cr} = koefisien rangkai = 2,0 untuk pratarik

= 1,6 untuk pasca tarik

E_c = modulus elastisitas beton saat umur beton 28 hari.

E_s = modulus elastisitas baja prategang.

f_{ci} = tegangan pada beton pada level pusat baja segera setelah transfer.

f_{cd} = tegangan pada beton akibat beban mati tambahan setelah prategang diberikan.

b. Kehilangan gaya prategang akibat susut beton (SH)

Seperti halnya pada rangkai beton, besarnya susut pada beton dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, tipe perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan. Untuk komponen struktur pascatarik, kehilangan prategang akibat susut agak lebih kecil karena sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pasca tarik. Besarnya kehilangan prategang akibat susut pada beton dapat dihitung dengan rumus:

$$SH = s_{cs}E_s \quad (2.9)$$

Dimana:

E_s = modulus elastisitas baja prategang

s_{cs} = regangan susut sisa total dengan harga

$\epsilon_{CS} = 300 \times 10^{-6}$ untuk struktur pra tarik

$\epsilon_{CS} = \frac{200 \times 10^{-8}}{\log(t+2)}$ untuk struktur pasca tarik, dengan t adalah usia beton pada waktu transfer prategang dalam hari.

c. Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja (RE)

Akibat perpendekan elastis (kehilangan gaya prategang seketika setelah peralihan) dan gaya prategang yang tergantung waktu, CR dan SH ada pengurangan berkelanjutan pada tegangan beton, jadi kehilangan gaya prategang akibat relaksasi berkurang. Sebenarnya balok prategang mengalami perubahan regangan baja yang konstan di dalam tendon bila terjadi rangkai yang tergantung pada nilai waktu. Oleh karena itu, ACI memberikan perumusan untuk menghitung kehilangan gaya prategang dimana nilai dari K_{re} ,

J dan C tergantung dari jenis dan tipe tendon, dimana untuk strand atau kawat *stress* yang dipakai adalah *relieved* derajat 1.745 Mpa.

Adapun perumusan tersebut yaitu:

$$RE = C \{ K_{RE} - J (SH + CR + ES) \} \quad (2.10)$$

Dimana:

KRE = koefisien relaksasi

J = factor waktu

C = factor relaksasi

SH = kehilangan tegangan akibat susut

CR = kehilangan tegangan akibat rangkai

ES = kehilangan tegangan akibat perpendekan elastic

2.6. Perencanaan End Block

Zona angkur merupakan bagian komponen struktur prategang pasca tarik dimana gaya prategang terpusat disalurkan ke beton dan disebarakan secara lebih merata ke seluruh bagian penampang. Panjang daerah zona angkur adalah sama dengan dimensi terbesar penampang. Sedangkan, untuk perangkat angkur tengah, zona angkur mencakup daerah terganggu di depan dan di belakang perangkat angkur tersebut.

Secara umum, zona angkur dibagi menjadi 2 jenis, yaitu:

1. Zona angkur lokal, yang berbentuk prisma persegi yang berada di sekitar angkur dan tulangan-tulangan pengekang.
2. Zona angkur global, yang merupakan daerah pengankuran sejauh dimensi terbesar penampang yang juga mencakup zona angkur lokal.

2.6.1. Distribusi Tegangan

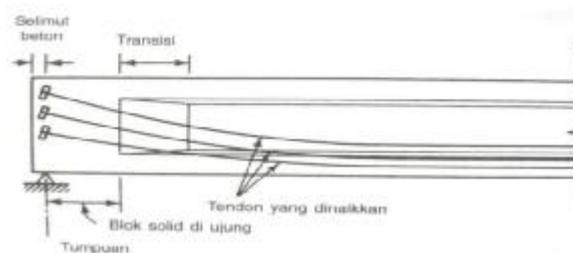
Pemusatan tegangan tekan yang besar dalam arah longitudinal terjadi di penampang tumpuan pada segmen kecil di muka ujung balok, baik pada balok pratarik maupun pada balok pasca tarik, akibat dari gaya prategang yang besar. Pada balok pratarik, *transfer* beban yang terpusat dari gaya prategang ke beton di

sekitarnya secara *gradual* terjadi di seluruh panjang l_t dari penampang tumpuan sampai pada dasarnya menjadi seragam.

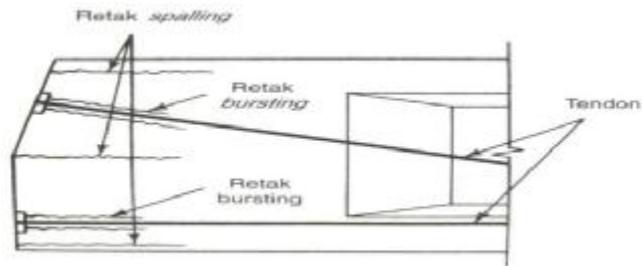
Pada balok pasca tarik, *transfer* dan distribusi beban secara *gradual* tidak mungkin terjadi karena gayanya bekerja secara langsung di muka ujung balok melalui pelat tumpu dan angkur. Juga sebagian atau seluruh tendon di balok pasca tarik ditinggikan atau dibentuk *drapped* ke arah serat atas melalui bagian badan dari penampang beton.

Adanya transisi secara tidak gradual pada tegangan tekan longitudinal dari yang terpusat ke bentuk yang terdistribusi linier menimbulkan tegangan tarik transversal besar di arah *vertikal (transversal)*. Retak longitudinal juga terjadi pada daerah angkur. Apabila tegangan tersebut melebihi modulus *rupture* beton, maka zona angkur akan terbelah (retak) secara longitudinal, kecuali apabila penulangan vertikal digunakan. Lokasi tegangan beton dan retaknya serta retak *spalling* atau *bursting* bergantung pada lokasi dan distribusi gaya terpusat horizontal yang diberikan oleh *tendon* prategang ke plat tumpu ujung.

Kadang-kadang luas penampang perlu diperbesar secara gradual di lokasi yang semakin mendekati tumpuan dengan cara membuat lebar badan di tumpuan sama dengan lebar sayap untuk mengakomodasi *tendon* yang ditinggikan, seperti terlihat pada Gambar 2.32. Namun peningkatan luas penampang tersebut tidak berkontribusi dalam mencegah retak *spalling* atau *bursting*, dan tidak mempunyai pengaruh pada pengurangan tarik transversal di beton. Pada kenyataannya, baik hasil pengujian maupun analisis teoritis dari masalah tegangan tiga dimensi menunjukkan bahwa tegangan tarik dapat membesar.



a. Transisi ke daerah solid di tumpuan



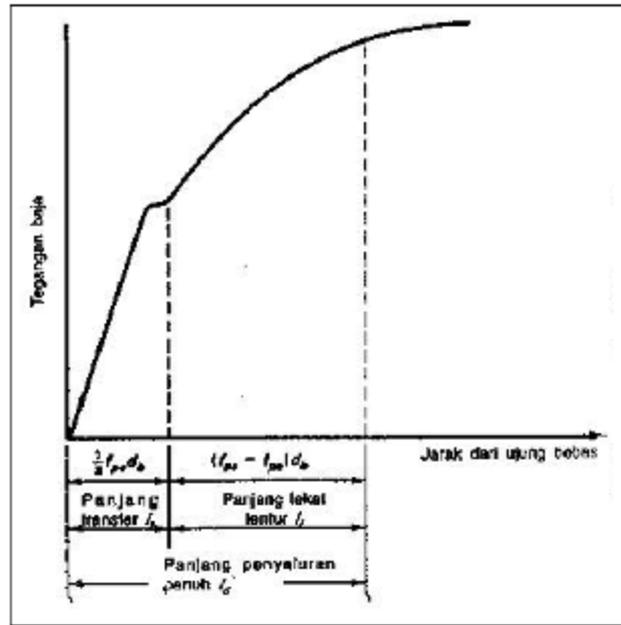
b. Zona ujung dan retak spalling

Gambar 2.31: Zona Angkur ujung untuk Tendon Terlekat.

Dengan demikian, kekuatan pengungkuran sangat dibutuhkan di daerah transfer beban dalam bentuk tulangan tertutup, sengkang atau alat-alat pengungkuran yang menutupi semua prategang utama dan penulangan longitudinal nonprategang. Dalam hal balok pasca tarik, kekuatan vertikal perlu diadakan untuk mengekang kait di dekat muka ujung di belakang plat tumpu.

2.7. Panjang Transfer dan Penyaluran pada Komponen Struktur Pratarik dan Desain Penulangan Angkur

Pada saat gaya *jacking* dilepaskan pada komponen struktur pratarik, gaya prategang secara dinamis ditransfer melalui lekatan antarmuka ke beton disekelilingnya. Adhesi antara *sekitar* tendon prategang dan beton di sepanjang terhingga dari *tendon* secara gradual mentransfer gaya prategang yang terpusat ke seluruh bagian beton di bidang-bidang yang jauh dari zona angkur dan menuju ke tengah bentang. Panjang penanaman menentukan besarnya prategang yang dapat timbul disepanjang bentang, semakin besar panjang penanaman, akan semakin besar pula prategang yang timbul. Pada Gambar 2.33 dijelaskan diagram hubungan antara tegangan baja dengan panjang penyaluran untuk *strand* prategang.



Gambar 2.32: Panjang penyaluran untuk *strand* prategang.

Dari Gambar 2.33, jelaslah bahwa panjang penanaman l_d yang menghasilkan pengembangan penuh tegangan merupakan kombinasi dari panjang *transfer* l_t dan panjang lekatan l_f . Panjang tersebut masing-masing adalah:

$$l_t = \frac{1}{1000} \left(\frac{f_{pe}}{3} \right) d_b \quad (2.27)$$

atau

$$l_t = \left(\frac{f_{pe}}{3} \right) d_b \quad (2.28)$$

dan

$$l_f = \frac{1}{1000} (f_{ps} - f_{pe}) d_b \quad (2.29)$$

Dimana:

f_{ps} = tegangan pada baja prategang dengan kekuatan nominal

f_{pe} = tegangan prategang efektif sesudah kehilangan gaya prategang

d_b = diameter nominal tendon prategang

Sehingga panjang minimum penyaluran yang diperlukan untuk *strands* prategang adalah:

$$\text{Min } l_d = \frac{1}{1000} \left(f_{ps} - \frac{2}{3} f_{pe} \right) d_b \quad (2.30)$$

Jika bagian dari *tendon* dilapisi di dekat ujung balok untuk mengurangi tegangan lekatan yang terkonsentrasi di ujung, maka *transfer* tegangan di daerah tersebut akan hilang dan panjang penyaluran l_d yang lebih besar dibutuhkan.

2.7.1. Daerah Angkur Pasca Tarik

Zona angkur dapat didefinisikan sebagai volume beton dimana gaya prategang yang terpusat pada angkur menyebar ke arah transversal menjadi terdistribusi linier di seluruh tinggi penampang di sepanjang bentang. Panjang daerah ini mengikuti prinsip St. Venant, yaitu bahwa tegangan menjadi seragam di lokasi sejauh kira-kira sama dengan penampang h diukur dari lokasi alat angkur. Keseluruhan prisma yang mempunyai panjang *transfer* h adalah zona angkur total. Zona ini terdiri atas 2 bagian:

1. Zona umum: Zona ini identik dengan zona angkur total. Panjangnya sama dengan tinggi penampang h pada kondisi standar.
2. Zona lokal: Zona ini adalah prisma beton di sekeliling dan tepat di depan alat angkur dan mengekang penulangan didalamnya.

Penulangan pengekang di seluruh zona angkur harus sedemikian direncanakan sehingga mencegah pembelahan dan *bursting* yang merupakan hasil dari gaya tekan terpusat besar yang disalurkan melalui alat angkur. Selain itu, pengecekan tegangan tumpu di beton pada zona lokal harus dilakukan, yang merupakan akibat dari gaya tekan besar tersebut, untuk menjamin bahwa kapasitas tumpu tekan izin beton tidak pernah dilampui.

Pada dasarnya, ada tiga metode yang digunakan untuk mendesain zona angkur, yaitu:

- a. Pendekatan Analisis Elastis Linier termasuk Penggunaan Elemen Hingga. Hal ini meliputi perhitungan keadaan tegangan elastis linier secara rinci.

Penerapan Metode Elemen Hingga ini agak dibatasi oleh sulitnya membuat model yang memadai yang dapat memodelkan secara benar retak yang terjadi beton. Sekalipun demikian, asumsi-asumsi yang memadai dapat selalu dilakukan untuk mendapatkan hasil yang masuk akal.

- b. Pendekatan Plastisitas yang didasarkan atas Keseimbangan seperti Model *Strut and Tie*. Metode *Strut and Tie* digunakan untuk mengidealisasi jejak gaya prategang sebagai struktur rangka batang dengan gaya-gaya yang mengikuti prinsip-prinsip keseimbangan yang biasa dikenal. Beban ultimit yang diperoleh dari metode ini dikontrol dengan kegagalan pada salah satu komponen tarik atau tekan. Metode ini biasanya memberikan hasil yang konservatif untuk aplikasi ini.
- c. Metode Pendekatan. Ini dapat digunakan untuk penampang persegi panjang tanpa diskontinuitas.

2.7.2. Metode Analisa Elastis Linier untuk Menentukan Tulangan Pengekang

Daerah angkur mengalami tiga level tegangan, yaitu:

- a. Tegangan tumpu besar didepan alat angkur. Pengekangan beton yang memadai dibutuhkan untuk mencegah kegagalan tekan.
- b. Tegangan tumpu tarik besar di daerah kontur tarik, tegak lurus sumbu tendon.
- c. Tekan besar di medan (pusat) tegangan.

Analisis tegangan elastis linier dapat memprediksi lokasi retak dan memberikan estimasi pendekatan yang dapat diyakini mengenai aliran tegangan sesudah terjadinya retak. Daerah penulangan tarik dihitung untuk memikul gaya tarik total yang diperoleh melalui integrasi tegangan tarik di beton. Di daerah tegangan tekan, jika gaya tekan sangat besar, adanya tulangan tekan tambahan menjadi keharusan.

Analisis elemen hingga elastis linier, menghasilkan penentuan yang lebih akurat mengenai keadaan tegangan di zona angkur. Namun, proses perhitungan tersebut sangat memakan waktu dan biaya serta hasilnya mungkin hanya terbatas karena kesulitan dalam mendapatkan model yang memadai yang dapat secara benar

memodelkan retak yang terjadi di beton. Sehingga, untuk memprediksi *respons* pasca retak dapat digunakan analisis elemen hingga *nonlinier*.

Adapun persamaan yang digunakan untuk menghitung luas total tulangan baja yang dibutuhkan adalah:

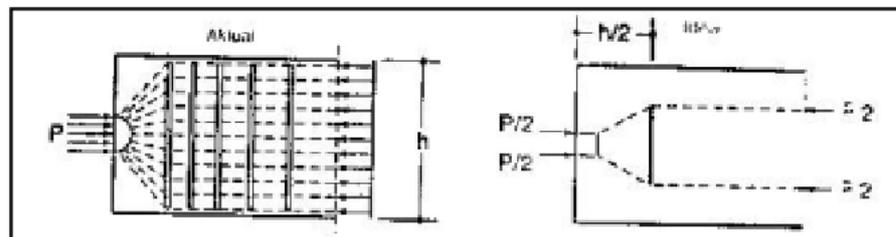
$$A_t = \frac{T}{f_s} \quad (2.31)$$

Dimana:

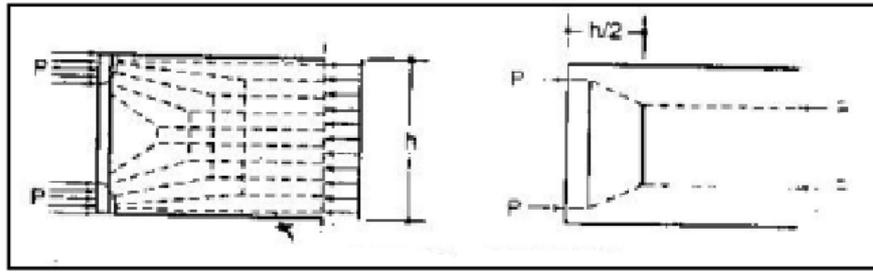
$$T = \frac{M_{max}}{h-x} \quad (2.32)$$

2.7.3. Metode *Strut and Tie* untuk Penulangan Blok Ujung Pengekang

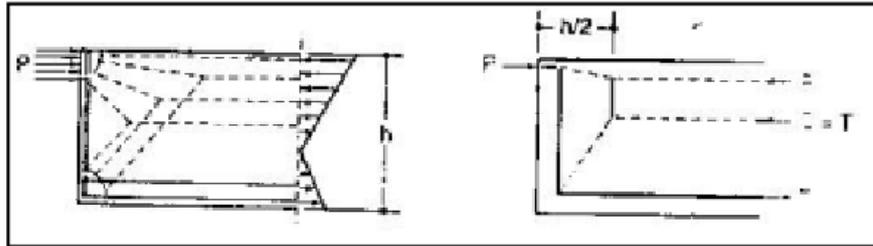
Konsep *Strut and Tie* didasarkan atas pendekatan plastisitas untuk aliran gaya di zona angkur dengan menggunakan sejumlah batang-batang lurus tarik dan tekan yang bertemu di titik-titik *diskret* yang disebut nodal sehingga membentuk rangka batang. Gaya tekan dipikul oleh batang tekan (*strut*) dan gaya tarik dipikul oleh penulangan nonprategang dari baja lunak yang berfungsi sebagai tulangan tarik pengekang atau oleh baja prategang. Kuat leleh tulangan pengekang angkur digunakan untuk menentukan luas penulangan total yang dibutuhkan didalam blok angkur. Gambar 2.34 mengilustrasikan aliran gaya prategang P konsentris dan eksentris di depan titik tangkap gaya tersebut melalui alat angkur menuju ujung zona umum dimana tegangan menjadi seragam dengan menggunakan prinsip St. Venant.



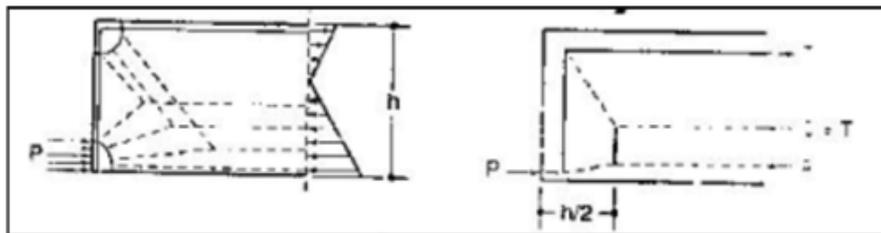
a. Plat tumpu yang terletak di tengah



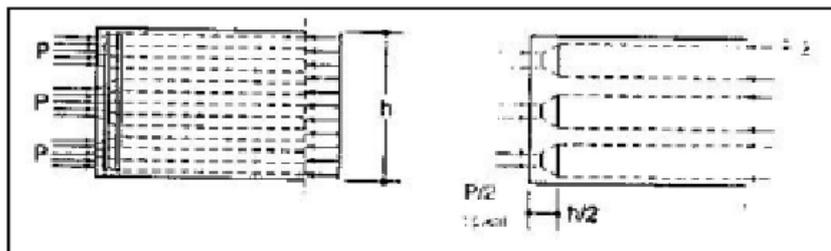
b. Plat tumpu di atas dan bawah



c. Plat tumpu di atas



d. Plat tumpu dibawah

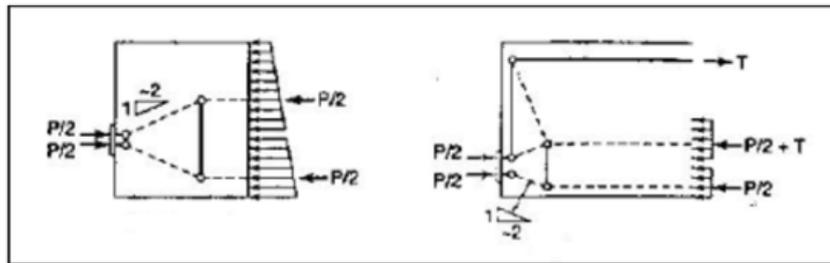


e. Plat tumpu yang terletak simetris

Gambar 2.33: Skema jejak gaya tekan pada model tekan dan tarik.

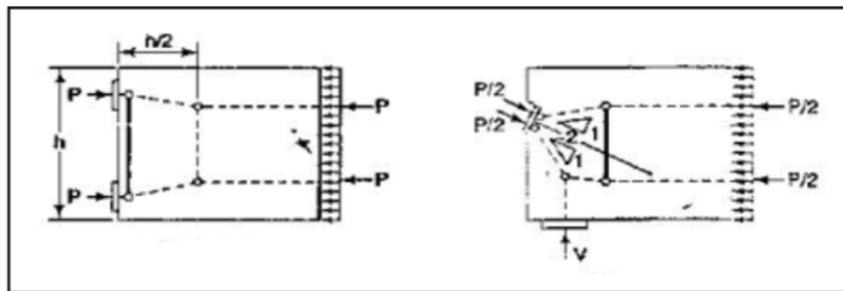
Setelah retak signifikan terjadi, trayektori tegangan tekan di beton cenderung memusat menjadi garis lurus yang dapat diidealisasikan menjadi batang lurus yang mengalami tekan *uniaksial*. Batang tekan ini dapat dipandang sebagai bagian dari uit rangka batang rangka batang dengan lokasi nodal yang ditentukan oleh arah

rangka batang tekan. Gambar 2.35 merangkum konsep model *Strut and Tie* ideal di zona angkur.



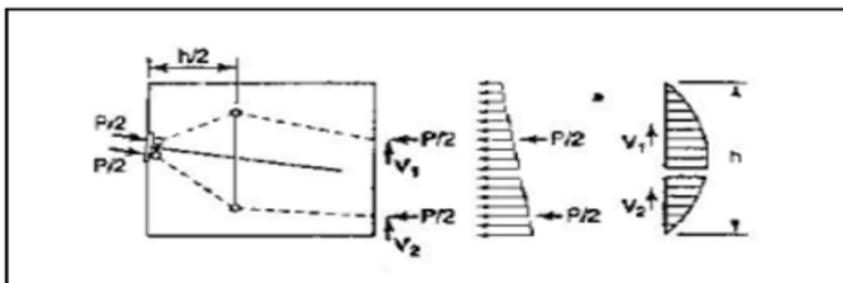
b. Eksentrisitas kecil

a. Eksentrisitas besar

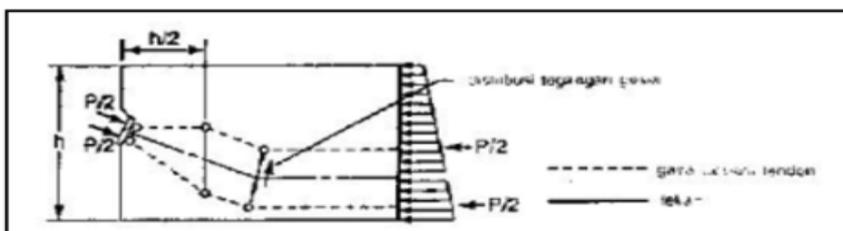


d. Angkur ganda

c. Angkur eksentris



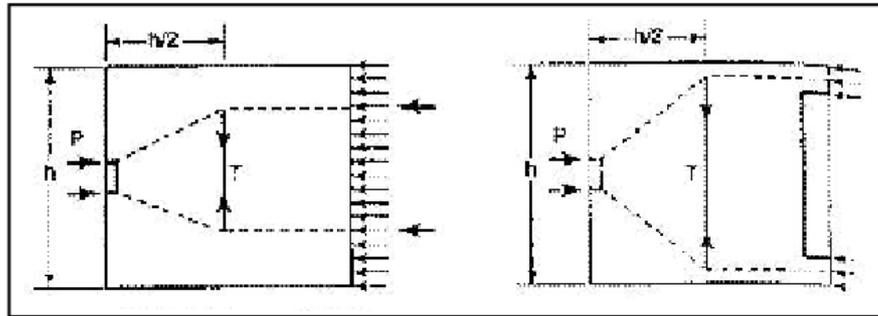
e. Tendon lurus dan miring



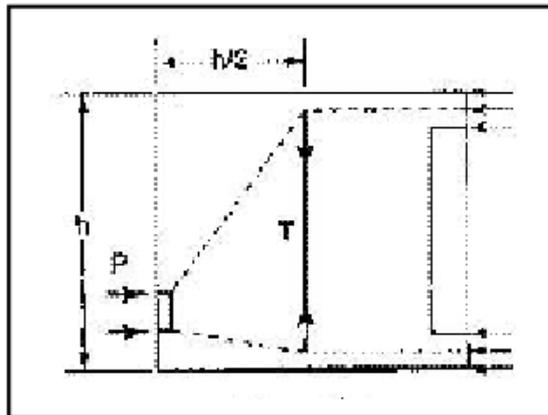
f. Tendon lengkung dan miring

Gambar 2.34: Model *Strut and Tie* Tipikal untuk Zona Angkur Ujung.

Gambar 2.36 menunjukkan sketsa rangka batang strut and tie untuk kasus konsentris dan eksentris untuk penampang solid dan penampang bersayap sebagaimana diberikan didalam SNI-2002.



a. Penampang persegi panjang, $T = 0,25 P$ b. Penampang bersayap, $T = 0,5 P$



c. Penampang bersayap, $T = 0,5 P$

Gambar 2.35: Rangka Batang Ideal pada Model *Strut and Tie* di kasus Eksentris dan Konsentris.

Batang tarik dalam analogi rangka batang dapat diasumsikan ada jarak $h/2$ dari alat angkut. Dari semua diagram, jelaslah bahwa perencana harus membuat *engineering judgment* mengenai banyaknya jejak tekan berikut tarik yang dihasilkan titik-titik nodalnya, khususnya di dalam kasus khusus yang menggunakan alat angkut berganda. Salah satu metode perhitungan yang dapat digunakan untuk perencanaan daerah pengangkutan global, yaitu:

$$T_{\text{pencair}} = 0,25 \sum P_{\text{su}} \left(1 - \frac{a}{h} \right) \quad (2.33)$$

$$D_{\text{pencar}} = 0,5 (h - 2e) \quad (2.34)$$

Dimana:

$\sum P_{\text{su}}$ = jumlah dari beban *tendon* terfaktor

a = tinggi alat angkut

e = eksentrisitas alat angkut

h = tinggi penampang

Alat angkut dipandang berjarak dekat apabila jarak as ke asnya tidak melebihi 1 kali lebar alat angkut tersebut.

2.8. Tegangan Tumpu Izin

Tegangan tumpu izin maksimum di dudukan alat angkut tidak boleh melebihi yang terkecil diantara dua nilai yang diperoleh dari kedua persamaan berikut:

$$f_b \leq 0,7 \square f'_{ci} \sqrt{\frac{A}{A_g}} \quad (2.35)$$

$$f_b \leq 2,25 \square f'_{ci} \quad (2.36)$$

Dimana:

f_b = beban *tendon* terfaktor maksimum P_u dibagi dengan luas tumpu efektif A_b

f'_{ci} = kuat tekan beton pada saat diberi tegangan

A = luas maksimum pada bagian dari permukaan pendukung secara geometris sama dengan luas yang dibebani dan konsentris dengannya

A_g = luas bruto plat tumpu

A_b = luas netto efektif plat tumpu yang dihitung sebagai luas A_g dikurangi dengan luas lubang-lubang di plat tumpu

Kedua persamaan di atas hanya berlaku jika penulangan di zona umum digunakan dan jika banyaknya beton di sepanjang sumbu *tendon* di depan alat angkut sedikitnya 2 kali panjang zona lokal.

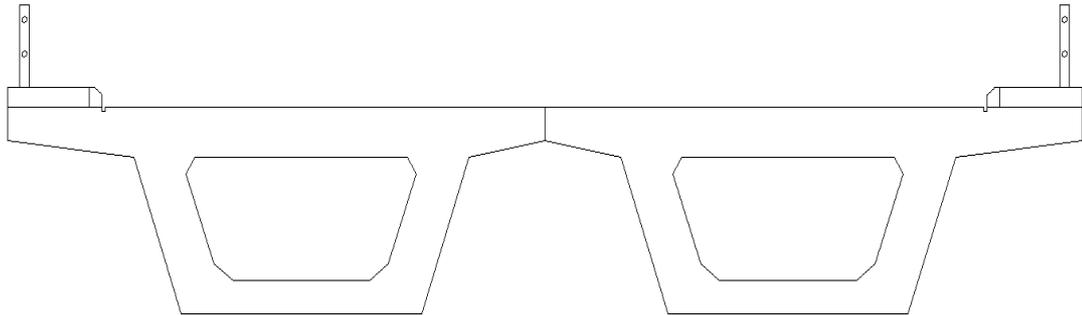
BAB 3

METODELOGI

3.1. Perencanaan Awal (Preliminary Design)

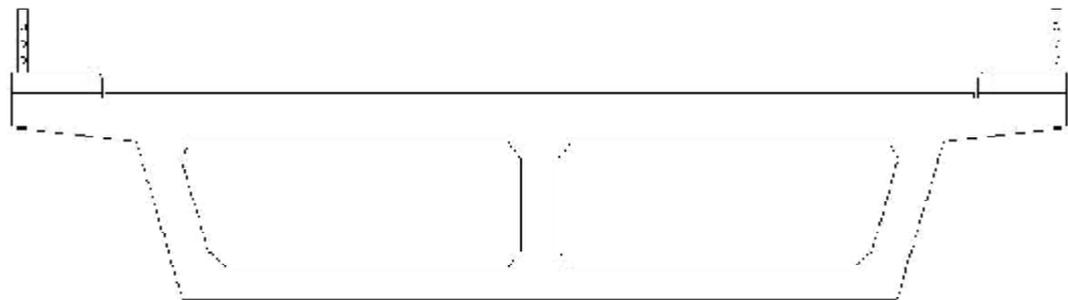
Pada bab ini akan dijelaskan mengenai metode perencanaan jembatan berdasarkan kriteria serta perhitungan gaya-gaya yang bekerja di dalamnya berdasarkan acuan pada peraturan RSNI T-02-2005 untuk mendapatkan faktor nilai keamanan serta efisiensi dalam perencanaan jembatan. Sebagaimana telah dijelaskan pada bab sebelumnya, perencanaan jembatan ini hanya difokuskan kepada perhitungan struktur atasnya saja. Jenis jembatan yang direncanakan menggunakan beton prategang serta *Profil Single Cellular* dan *Twin Cellular Box Girder*.

1. *Type Single Cellular*



Gambar 3.1: Penampang Box Girder *Type Single Cellular*.

2. *Type Twin/Multi Cellular*



Gambar 3.2: Penampang Box Girder *Type Twin/Multi Cellular*.

3.2. Kriteria Desain Jembatan

Konstruksi jembatan yang direncanakan adalah konstruksi jembatan *box girder prestressed* dengan data-data sebagai berikut:

Panjang total	: 150 meter, terdiri dari 3 bentang
Panjang bentang	: 50 m
Tipe <i>Box Girder Prestressed</i>	: <i>single cellular</i> dan <i>twin cellular</i>
Lebar total	: 17 meter
Lebar perkerasan jalan	: 14 meter
Lebar trotoar	: 2 x 1,5 meter
Jumlah lajur	: 4 x 3,5 meter
Jumlah jalur	: 2 x 7 meter

3.3. Peraturan Struktur

1. Peraturan perencanaan teknik jembatan RSNI T-02-2005
2. Perencanaan struktur beton untuk jembatan SNI T-12-2004
3. Tabel ASTM A-416

3.4. Spesifikasi Bahan

Dalam merencanakan sebuah jembatan bahan seperti beton dan baja digunakan untuk membuat elemen struktur jembatan yang dipengaruhi oleh dimensi elemen struktur, dan beban yang diterima oleh struktur tersebut. Oleh karena itu spesifikasi bahan beton maupun baja pada setiap elemen struktur jembatan disesuaikan dengan kebutuhan perencanaan dan dapat mempermudah proses pelaksanaan.

1. Beton

- Kuat tekan beton prategang K-600 = $(f^c) = \frac{0,83 \times 600}{10} = 49,8 \text{ Mpa}$
- Kuat tekan beton untuk struktur sekunder $(f^c) = 30 \text{ Mpa}$

2. Baja

- Mutu baja yang digunakan adalah mutu baja dengan jenis *strand seven wire stress relieved* (7 untai) VSL, *Astrand* = 140 mm².

- Mutu baja yang digunakan untuk pekerjaan pelat lantai adalah baja mutu (f_y) = 400 Mpa.
- Mutu baja yang digunakan untuk pekerjaan struktur sekunder adalah baja mutu (f_y) = 240 Mpa.

3.5. Tegangan Ijin Bahan

Tegangan yang terjadi pada setiap elemen jembatan tidak boleh melebihi dari tegangan ijin bahannya. Berikut adalah tegangan ijin bahannya:

3.5.1. Beton Prategang (f'_c) = 49,8 Mpa

- Pada saat *transfer*

Adalah tahap dimana gaya prategang dipindahkan pada beton dan belum ada beban luar yang bekerja selain berat sendiri. Pada tahap ini gaya prategang maksimum sebab belum ada kehilangan prategang dan kekuatan beton minimum sebab umur beton masih muda.

$$f_{ci} = 80\% \times f'_c$$

$$f_{ci} = 80\% \times 49,8$$

$$f_{ci} = 39,84 \text{ Mpa}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$F_{cc} = 0,6 \times f_{ci}$$

$$F_{cc} = 0,6 \times 39,84$$

$$F_{cc} = 23,904 \text{ Mpa}$$

Tarik

$$F_{ct} = 0,25 \times \sqrt{f_{ci}}$$

$$F_{ct} = 0,25 \times \sqrt{39,84}$$

$$F_{ct} = 0,95 \text{ Mpa}$$

- Pada saat *service*

Adalah tahap beban kerja, setelah memperhitungkan kehilangan gaya prategang. Pada tahap ini gaya prategang mencapai nilai terkecil dan kombinasi beban luar mencapai nilai terbesar yaitu meliputi berat sendiri, beban mati, beban hidup dan beban-beban lainnya.

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$F_{cc} = 0,45 \times f_c'$$

$$F_{cc} = 0,45 \times 49,8$$

$$F_{cc} = 22,41 \text{ Mpa}$$

Tarik

$$F_{ct} = 0,5 \times \sqrt{f_c'}$$

$$F_{ct} = 0,5 \times \sqrt{49,8}$$

$$F_{ct} = 1,587 \text{ Mpa}$$

Modulus Elastisitas

$$\begin{aligned} E_c &= w_c^{1,5} (0,043 \sqrt{f_c'}) \\ &= 2550^{1,5} (0,043 \sqrt{49,8}) \\ &= 39074,5 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

3.5.2. Baja Prategang

Peraturan-peraturan untuk baja prategang terdapat pada SNI T-12-2004 Pasal 4.4.3.

- Modulus elastisitas (E_s) = 200.000 Mpa
- Kabel prategang

Baja prategang direncanakan menggunakan kabel *strand seven wires stress relieved* (7 kawat untai). Dengan mengacu pada Tabel ASTM A-416, berikut adalah jenis dan karakteristik dari baja prategang yang digunakan.

- Jenis *strand* = *Uncoated 7 wire superstrand* ASTM A-416 grade 270
- Diameter = 15,2 mm
- Luas nominal penampang *strand* (AS) = 140 mm²

- Nominal massa = 1,102 kg/m
- Beban putus nominal satu *strand* = 260,7 kN

3.6. Perencanaan Struktur Skunder

3.6.1. Perhitungan Tiang Sandaran

Berdasarkan pada peraturan perencanaan teknik jembatan yang mengacu pada RSNI T-02-2005 Pasal 12.5, beban yang bekerja pada tiang sandaran adalah berupa gaya horizontal sebesar 0,75 KN/m yang bekerja pada tiang sandaran setinggi 100 cm terhitung dari lantai trotoar. Tiang sandaran direncanakan untuk beban daya layan rencana sebesar.

$$W = W \times L$$

$$W = 0,75 \times 2$$

$$W = 1,5 \text{ kN}$$

Dimana:

L = jarak antara tiang sandaran

Tiang sandaran juga menerima beban angin sebesar:

$$H_w = 0,0006 \times C_w \times A_s \times (V_w)^2 \text{ [kN]}$$

Dimana:

H_w = Kecepatan angin rencana (m/dt)

C_w = Koefisien seret, dari Tabel RSNI T-02-2005

V_w = Kecepatan angin rencana (m/dt²), dari Tabel 28

A_s = Luas koefisien bagian samping jembatan (m²)

$$\text{Panjang total jembatan} = 150 \text{ m}$$

$$\text{Jarak tiang sandaran} = 2 \text{ m}$$

Bahan yang digunakan:

$$\text{Mutu beton (f}'_c) = 30 \text{ Mpa}$$

$$\text{Mutu baja (f}'_y) = 240 \text{ Mpa}$$

Pipa sandaran:

$$\text{Diameter pipa (D)} = 60 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}
\text{Tebal pipa} &= 3 \text{ mm} \\
\text{Diameter dalam (d)} &= \text{diameter pipa (D)} - 2 (\text{tebal pipa}) \\
&= 60 - 2 (3) \\
&= 54 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Beban angin yang diterima oleh tiang sandaran:

$$\frac{b}{d} = \frac{17000}{3750} = 4,5$$

Dimana:

$$\begin{aligned}
d &= \text{tinggi } \textit{box girder} \text{ (struktur utama)} + \text{tinggi trotoar} + \text{tinggi sandaran} \\
&= 250 \text{ cm} + 25 \text{ cm} + 100 \text{ cm} \\
&= 375 \text{ cm} = 3750 \text{ mm}
\end{aligned}$$

Keterangan:

b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar jembatan

d = tinggi bangunan atas, termasuk tinggi bangunan sandaran masif

Tinggi rencana *box girder* diperoleh dari rasio tinggi terhadap bentang (Bambang, 2007):

$$\frac{1}{30} < \frac{h}{L} < \frac{1}{15} \quad (4.1)$$

Untuk bentang $L = 50$ meter, direncanakan $\frac{h}{L}$ sebesar $\frac{1}{20}$ sehingga diperoleh h taksiran = 2,5 meter. Nilai C_w diperoleh dengan menginterpolasi nilai $\frac{b}{d}$ yang terdapat pada Tabel 27 RSNI T-02-2005. Untuk nilai $\frac{b}{d}$ sebesar 4,5 maka diperoleh:

Nilai koefisien seret $C_w = 1,3$ (dari hasil interpolasi b/d)

Nilai $V_w = 30$ m/s, karena letak jembatan yang jauh dari pantai (asumsi)

$$\begin{aligned}
\text{Nilai } A_s &= \text{tinggi tiang sandaran} \times \text{jarak antara tiang sandaran} \\
&= 1 \text{ m} \times 2 \text{ m} \\
&= 2 \text{ m}^2
\end{aligned}$$

Sehingga diperoleh nilai H_w sebesar:

$$\begin{aligned}
H_w &= 0,0006 \times C_w \times (V_w)^2 \times A_s \\
&= 0,0006 \times 1,3 \times (30)^2 \times 2 \\
&= 1,4 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Jadi, momen ultimit (Mu) yang dipikul oleh tiang sandaran:

$$\begin{aligned} Mu &= (\text{beban angin } H_w + \text{beban daya layan}) \times \text{tinggi tiang sandaran} \\ &= (1,4 + 1,3) \times 1 \\ &= 2,7 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$Mn = \frac{Mu}{\phi} = \frac{2,7}{0,8} = 3,375 \text{ kNm} = 3,37 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

3.6.2. Penulangan

Dimensi tiang sandaran direncanakan = 15 cm x 15 cm

Beton *dacking* = 40 mm

Direncanakan menggunakan tulangan $\phi = 10 \text{ mm}$

$$Mn = 3,37 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

$$\begin{aligned} d &= 150 - 40 - \left(\frac{1}{2}\right)\phi \\ &= 150 - 40 - \left(\frac{1}{2}\right)10 \\ &= 105 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$Rn = \frac{Mn}{\phi \times b \times d^2} = \frac{3,37 \times 10^6}{0,8 \times 150 \times 105^2} = 2,54 \text{ Mpa}$$

$$m = \frac{f'cy}{0,85 \times f'c} = \frac{240}{0,85 \times 30} = 9,4$$

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f'cy} = \frac{1,4}{240} = 0,0058$$

$$\begin{aligned} \rho_{balance} &= \frac{0,85 \times f'c \times \beta}{f'cy} \times \frac{600}{600 + f'cy} \\ &= \frac{0,85 \times 30 \times 0,85}{240} \times \frac{600}{600 + 240} \\ &= 0,1354 \times 0,7142 \\ &= 0,0645 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{max} &= 0,75 \times \rho_{balance} \\ &= 0,75 \times 0,0645 \\ &= 0,0483 \end{aligned}$$

$$P_{perlu} = \frac{1}{m} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m \times Rn}{f'cy}} \right\}$$

$$= \frac{1}{9,4} \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times 9,4 \times 2,54}{240}} \right\}$$

$$= 0,0329$$

Karena $\rho_{perlu} > \rho_{min}$ dan $\rho_{max} < \rho_{perlu}$ maka digunakan = 0,0329

$$\begin{aligned} As &= \rho_{perlu} \times b \times d \\ &= 0,0329 \times 150 \times 105 \\ &= 518 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dengan data diatas, maka direncanakan penulangan dengan menggunakan besi tulangan 5 Ø 12 ($As = 565 \text{ mm}^2$).

3.6.3. Trotoar

Trotoar akan direncanakan dengan dimensi lebar 130 cm dan tebal 25 cm dan diletakkan di atas lantai kendaraan dan terdapat di masing-masing jalur. Berdasarkan acuan pada RSNI T-02-2005 semua elemen dari trotoar atau jembatan penyeberangan yang langsung memikul pejalan kaki harus direncanakan untuk memikul beban nominal sebesar 5 kPa.

Data-data yang dibutuhkan untuk perhitungan:

Panjang total jembatan	= 150 meter
Jumlah trotoar	= 2 buah (kiri-kanan)
Lebar trotoar	= 130 cm
Tebal trotoar	= 25 cm

Luas areal yang dibebani pejalan kaki:

$$\begin{aligned} A &= \text{Lebar trotoar} \times \text{Panjang total jembatan} \\ &= 1,3 \text{ m} \times 150 \text{ m} \\ &= 195 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan pada peraturan RSNI T-02-2005 (Pasal 6.9, Gambar 10 Pembebanan untuk pejalan kaki) diperoleh:

$A > 100 \text{ m}^2$, maka beban nominal sebesar 2 kPa.

Dari ketentuan diatas, maka untuk areal seluas 195 m^2 akan menghasilkan beban nominal pejalan kaki sebesar:

$$2 \text{ kPa} = 200 \text{ kg/m}^2 = \frac{200 \text{ kg/m}^2}{1,3 \text{ m}} = 153,8 \text{ kg/m}$$

Beban tersebut akan dibebankan pada beban utama jembatan.

BAB 4

ANALISA DAN PERHITUNGAN

4.1. Perencanaan Struktur Primer

4.1.1. Preliminary Design

Dalam bidang rekayasa jembatan tindakan dasar dari kemampuan kreatifitas adalah imajinasi (Troitsky, 1994). Untuk merencanakan sebuah jembatan, hal penting pertama adalah mengimajinasikannya. Bagaimanapun, untuk mengimajinasikan suatu jembatan, seorang perencana seharusnya memiliki pengalaman dalam pekerjaannya dan mengaplikasikannya pada lokasi setempat.

Preliminary Design atau desain awal atau estimasi dari perencanaan jembatan yang akan di buat. Pada tahap ini bukanlah spesifikasi yang akan dikerjakan di lapangan, namun hanya spesifikasi struktur yang akan dimodelkan dalam sebuah software yang selanjutnya akan dites dengan memasukkan pembebanan yang telah di tentukan sebelumnya.

4.1.2. Perencanaan Dimensi *Box Girder*

4.1.2.1. *Box Girder Type Single Cellular*

Struktur utama jembatan menggunakan profil *box girder prestress* dengan tipe *single cellular* dengan lebar total 17 m, yang terbagi menjadi 3 bentang dengan masing-masing bentang berjarak 50 m. Jembatan ini disangga oleh dua pilar dan 2 abutmen. Perencanaan dimensi *box girder* yang digunakan didapat dari cara *trial and error*, dan berdasarkan peraturan dan ketentuan yang berlaku.

Adapun pedoman dalam pemilihan tampang tampang melintang gelagar diberikan oleh Podolny & Muller (1982), sebagai berikut:

1. Lebar jembatan dan jarak web

Untuk gelagar kotak tunggal, lebar jembatan tidak lebih dari 12 m.

- a. Jarak web: 4 – 7,5 m

- b. Panjang bagian kantilever: sampai dengan 1/4 lebar gelagar

2. Tebal sayap atas

Tebal minimum untuk sayap atas yang digunakan berdasarkan panjang bentang antar web, yaitu:

Tabel 4.1: Ketentuan sayap atas profil *box girder*.

Bentang antar web	Tebal minimum sayap atas
Kurang dari 3 m	175 mm
Antara 3 – 4,5 m	200 mm
Antara 4,5 – 7,5 m	250 mm
Lebih dari 7,5m	Digunakan sistem rib atau <i>hollow slab</i>

3. Tebal web

Tebal web minimum adalah sebagai berikut:

- 200 mm, jika tidak terdapat tendon pada web.
- 250 mm, jika terdapat *duck* kecil baik vertikal maupun longitudinal.
- 300 mm, jika digunakan tendon dengan *strand* 12,5 mm.
- 350 mm, jika tendon di angkur pada web.

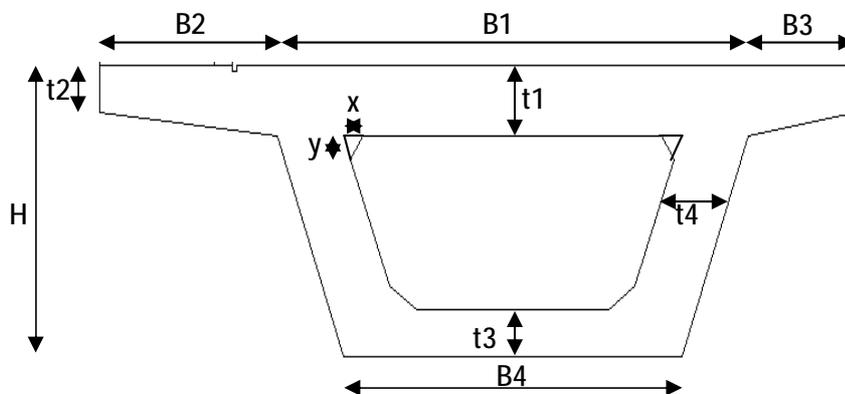
4. Tebal sayap bawah

- 175 mm, jika *duck* tidak diletakkan pada sayap.
- 200 – 250 mm, jika *duck* diletakkan pada sayap.

5. Rasio tinggi terhadap bentang

Rasio tinggi terhadap bentang adalah $1/15 < h/L < 1/30$.

Berdasarkan pedoman di atas dipilih potongan melintang gelagar jembatan seperti gambar berikut:

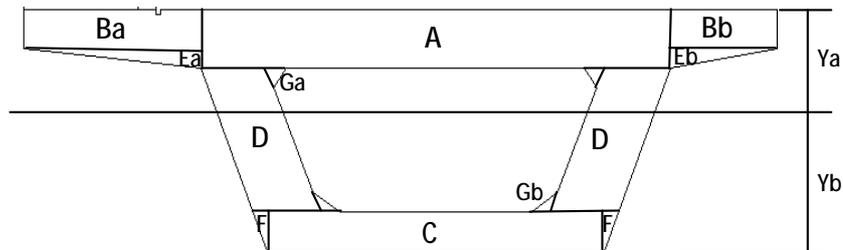


Gambar 4.1: Potongan melintang profil gelagar jembatan.

Tabel 4.2: Dimensi profil melintang *box girder*.

Slab atas bagian tengah	$B_1 = 5,3$ meter
	$t_1 = 0,6$ meter
Slab bagian tepi	$B_2 = 2$ meter
	$B_3 = 1,2$ meter
	$t_2 = 0,4$ meter
Tinggi <i>box girder</i>	$H = 2,5$ meter
Dinding tepi	$t_4 = 0,6$ meter
Slab bawah	$B_4 = 3,8$ meter
	$t_3 = 0,4$ meter
Penebalan pada pertemuan slab dan dinding	$X = 0,2$ meter
	$Y = 0,2$ meter

Perhitungan *Section Properties Box Girder Prestress*.



Gambar 4.2: Bagian *section properties* pada gelagar jembatan.

Tabel 4.3: Perhitungan *properties section box girder prestress*.

Section Properties	b (m)	H (m)	Bentuk	Pias	Luas Tampang (m ²)	Y (m)	Statis Momen A*Y (m ³)	Ya	Yb	Inersia Momen (m ⁴)
A	5,3	0,6	Persegi	1	3,18	0,3	0,954	0,91	1,59	1,28
Ba	2	0,4	Persegi	1	0,80	0,2	0,16			0,41
Bb	1,2	0,4	Persegi	1	0,48	0,2	0,10			0,25
C	3,8	0,4	Persegi	1	1,52	2,3	2,76			2,96
D	0,6	1,5	Persegi	2	1,80	1,35	2,43			0,52
Ea	2	0,2	Segitiga	1	0,20	0,5	0,1			0,02
Eb	1,2	0,2	Segitiga	1	0,12	0,5	0,06			0,03
F	0,2	0,4	Segitiga	2	0,08	1,35	0,108			0,02
Ga	0,2	0,2	Segitiga	2	0,04	0,7	0,028			0,002
Gb	0,2	0,2	Segitiga	2	0,04	2	0,08			0,02
Nilai total					8,26		7,51			5,54

Dimana:

b = lebar

h = tinggi

y = jarak titik berat pias ke serat atas

ya = jarak terhadap alas = $\frac{\sum A_i y_i}{\sum A}$

yb = H - Ya

Momen inersia = $[\frac{1}{36} \times b \times h^3] + [\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2]$ untuk bentuk segitiga

= $[\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2]$ untuk bentuk persegi

Analisa data:

$$\begin{aligned} \text{A. I} &= [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2] \\ &= [\frac{1}{12} \times 5,3 \times 0,6^3] + [3,18 \times (0,3 - 0,91)^2] \\ &= 1,28 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ba. I} &= [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2] \\ &= [\frac{1}{12} \times 2 \times 0,4^3] + [0,80 \times (0,2 - 0,91)^2] \\ &= 0,41 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Bb. I} &= [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2] \\ &= [\frac{1}{12} \times 1,2 \times 0,4^3] + [0,48 \times (0,2 - 0,91)^2] \\ &= 0,25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{C. I} &= [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2] \\ &= [\frac{1}{12} \times 3,8 \times 0,4^3] + [1,52 \times (2,3 - 0,91)^2] \\ &= 2,96 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{D. I} &= [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2] \\ &= [\frac{1}{12} \times 0,6 \times 1,5^3] + [1,80 \times (1,35 - 0,91)^2] \\ &= 0,52 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ea. I} &= [\frac{1}{36} \times b \times h^3] + [\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2] \\ &= [\frac{1}{36} \times 2 \times 0,20^3] + [\frac{1}{2} \times 0,20 \times (0,5 - 0,91)^2] \\ &= 0,02 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ea. I} &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - y_a)^2 \right] \\
 &= \left[\frac{1}{36} \times 1,2 \times 0,20^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times 0,12 \times (0,5 - 0,91)^2 \right] \\
 &= 0,03
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{F. I} &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - y_a)^2 \right] \\
 &= \left[\frac{1}{36} \times 0,2 \times 0,4^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times 0,08 \times (1,35 - 0,91)^2 \right] \\
 &= 0,02
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ga. I} &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - y_a)^2 \right] \\
 &= \left[\frac{1}{36} \times 0,2 \times 0,2^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times 0,04 \times (0,7 - 0,91)^2 \right] \\
 &= 0,002
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Gb. I} &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - y_a)^2 \right] \\
 &= \left[\frac{1}{36} \times 0,2 \times 0,2^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times 0,04 \times (2 - 0,91)^2 \right] \\
 &= 0,02
 \end{aligned}$$

Hasil yang diperoleh:

$$\text{Jumlah luas penampang (A)} = 8,26 \text{ m}^2$$

$$\text{Jumlah statis momen (A*Y)} = 7,51 \text{ m}^3$$

$$\text{Jumlah inersia momen } I_o = 5,54 \text{ m}^4$$

Perhitungan Letak Titik Berat

$$\text{Tinggi } \textit{box girder prestress} \text{ (H)} = 2,5 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang } \textit{box girder prestress} \text{ (A)} = 8,26 \text{ m}^2$$

Letak titik berat:

$$Y_a = \frac{\sum A*Y}{\sum A} = \frac{7,51}{8,26} = 0,91 \text{ m}$$

$$Y_b = H - Y_a = 2,5 - 0,91 = 1,59 \text{ m}$$

Perhitungan momen tahanan (modulus penampang)

$$\begin{aligned}\text{Momen inersia terhadap alas balok: } I_b &= \sum A \times Y^2 + \sum I_o \\ &= 19,10 \text{ m}^4 + 5,54 \text{ m}^4 \\ &= 24,644 \text{ m}^4\end{aligned}$$

Momen inersia terhadap titik berat balok:

$$\begin{aligned}I_x &= I_b - A \times Y_b^2 \\ &= 24,644 \text{ m}^4 - (8,26 \text{ m}^2 \times 1,59) \\ &= 11,51 \text{ m}^4\end{aligned}$$

Momen tahanan sisi atas:

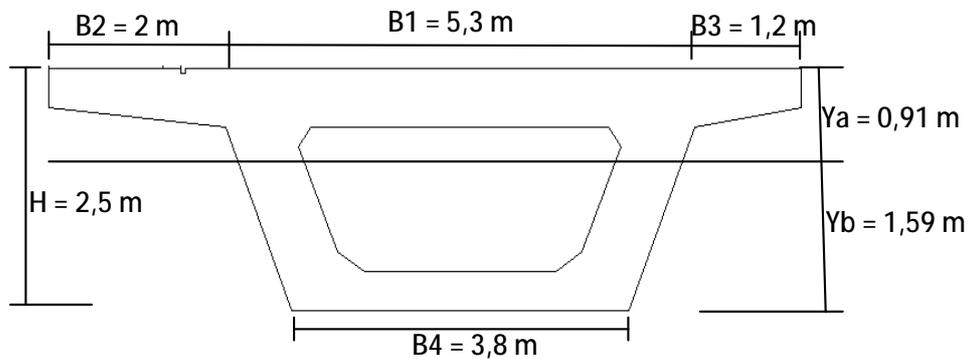
$$W_a = \frac{I_x}{Y_a} = \frac{11,51}{0,91} = 12,6 \text{ m}^3$$

Momen tahanan sisi bawah:

$$W_b = \frac{I_x}{Y_b} = \frac{11,51}{1,59} = 7,2 \text{ m}^3$$

$$\text{Berat beton } prestress (W_c) = 2500 \text{ kg/m}^3 = 25 \text{ kN/m}^3 (\text{asumsi})$$

$$\begin{aligned}\text{Berat sendiri } box \text{ girder } prestress &= A \times W_c = 8,26 \times 25 = 206,5 \text{ kN/m} \\ &= 20,65 \text{ T/m}\end{aligned}$$



Gambar 4.3: Spesifikasi potongan melintang *box girder* yang direncanakan.

4.1.3. Analisa Pembebanan

Aksi-aksi yang bekerja pada jembatan:

1. Aksi Tetap

a. Analisa Berat Sendiri

Perhitungan besarnya momen akibat berat sendiri struktur langsung dihitung dengan sendirinya menggunakan SAP 2000 v.11 dengan mutu beton dan material sesuai dengan peraturan.

Berat sendiri profil *box girder*

$$\text{Berat beton } \textit{prestress} (W_c) = 2550 \text{ kg/m}^3 = 25,5 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Berat sendiri } \textit{box girder prestress} (P_{MS}) = A \times W_c = 8,26 \times 25,5 = 206,5 \text{ kN/m}$$

b. Analisa Beban Mati Tambahan

- Berat lapisan aspal (*surface*)

Tebal aspal x lebar lantai kendaraan x Bj. Aspal

$$= 0,05 \text{ m} \times 6,5 \text{ m} \times 2200 \text{ kg/m}^3$$

$$= 715 \text{ kg/m}$$

- Berat trotoar

Tebal trotoar x lebar trotoar x Bj. Beton x jumlah

$$= 0,25 \text{ m} \times 1,3 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^2 \times 1$$

$$= 780 \text{ kg/m}$$

- Berat kerb

Tebal kerb x lebar kerb x Bj. Beton x jumlah

$$= 0,25 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^2 \times 1$$

$$= 120 \text{ kg/m}$$

- Berat tiang sandaran dan penerangan (asumsi)

$$= 125 \text{ kg/m}$$

- Berat air hujan (5 cm)

$$= 0,05 \text{ m} \times 8,5 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$= 425 \text{ kg/m}$$

$$\text{Total beban mati tambahan } (P_{MA}) = 2165 \text{ kg/m} = 2,165 \text{ T/m} = 22,65 \text{ kN/m}$$

2. Beban Lajur “D”

Untuk perhitungan kekuatan lantai kendaraan atau sistem lantai kendaraan jembatan harus digunakan beban “T”, yaitu beban yang merupakan kendaraan truk yang mempunyai beban roda ganda (*dual wheel load*) sebesar 10 ton.

a. Beban Terbagi Merata (BTR)

Beban terbagi merata dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.12 dan 2.13 yang mengacu pada peraturan RSNI T-02-2005 Pasal 6.3.1 ayat 2. Jadi, dengan bentang jembatan 50 m intensitas beban terbagi merata dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.13 seperti berikut:

$$L \leq 30 \text{ m}; q = 9,0 \text{ kN/m}^2$$

$$L > 30 \text{ m}; q = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kN/m}^2$$

Untuk penyebaran gaya arah melintang $L = 50 \text{ m}$

- Sepanjang 5 m:

$$q_{\text{BTR}_{50}} = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{50}\right) \times 5 \times 100\% = 36 \text{ kN/m}$$

- Sepanjang $(B - 1,5) - 5 \text{ m} = (8,5 - 1,5) - 5 = 2 \text{ m}$

$$q_{\text{BTR}_{50}} = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{50}\right) \times 2 \times 50\% = 7,2 \text{ kN/m}$$

Total beban terbagi merata yang bekerja sepanjang bentang 50 meter adalah:

$$q_{\text{BTR}_{\text{total}}} = 36 + 7,2 = 43,2 \text{ kN/m}$$

b. Beban Garis Terpusat (BGT)

Berdasarkan RSNI T-02-2005 Pasal 6.3.1 ayat 3, beban garis ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas jembatan. Besar intensitas beban garis adalah 49,0 kN/m.

Faktor beban dinamis untuk bentang 50 meter menurut Rumus 2.16 pada RSNI T-02-2005, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{FBD} &= 0,4 - 0,0025 (L - 50) \\ &= 0,4 - 0,0025 (50 - 50) \\ &= 0,3975 \end{aligned}$$

- $L = 5$ meter

$$\begin{aligned}
 P_{TD} &= 49 \times (1 + \text{FBD}) \times \text{lebar lajur} \times 100\% \\
 &= 49 \times (1 + 0,3975) \times 5 \times 100\% \\
 &= 342,3875 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

- $L = 2$ meter

$$\begin{aligned}
 P_{TD} &= 49 \times (1 + \text{FBD}) \times \text{lebar lajur} \times 50\% \\
 &= 49 \times (1 + 0,3975) \times 2 \times 50\% \\
 &= 68,4775 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Total dari beban garis (BGT) yang diperoleh adalah

$$\begin{aligned}
 &= P_{TD} 7 \text{ m} + P_{TD} 5 \text{ m} \\
 &= 342,3875 \text{ kN} + 68,4775 \text{ kN} \\
 &= 410,865 \text{ kN (terpusat ditengah bentang)}
 \end{aligned}$$

c. Beban truk “T”

Beban truk “T” adalah sebesar 112,5 kN dengan faktor kejut FBD = 30% untuk bentang 150 m.

$$\begin{aligned}
 TU' &= 112,5 \times (1 + \text{FBD}) \times \text{load faktor} (K_{TB}^U) \\
 TU' &= 112,5 \times (1 + 0,3) \times 1,8 \\
 TU' &= 292 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

3. Analisa Beban Dari Aksi Lingkungan

a. Beban Angin

Beban angin pada jembatan merupakan beban merata yang bekerjapada bidang horizontal dan tegak lurus dengan sumbu memanjangjembatan. Beban angin yang bekerja pada gelagar utama jembatan dapatdihitung dengan rumus sebagai berikut:

Apabila suatu kendaraan sedang berada di atas jembatan, beban garis merata tambahan arah horizontal harus diterapkan pada permukaan lantai seperti diberikan dengan rumus:

$$T_{EW} = 0,0012 \times C_w \times V_w^2 \quad (4.2)$$

Dimana:

V_w = kecepatan angin rencana (m/dt) untuk keadaan batas yang ditinjau

C_w = koefisien seret yang besarnya tergantung dari perbandingan dari lebar total jembatan dengan tinggi bangunan atas termasuk tinggi bagian sandaran yang masif (b/d).

Untuk nilai C_w , diperoleh dengan menginterpolasi nilai b/d yang terdapat pada Tabel 27 RSNI T-02-2005.

$$\frac{b}{d} = \frac{17000}{3750} = 4,5$$

Dengan perbandingan b/d sebesar 4,5 maka diperoleh nilai koefisien seret $C_w = 1,3$ (didapat dari hasil interpolasi). Asumsi kecepatan angin rencana adalah 30 m/s (dianggap jembatan berada jauh dari pantai).

$$\begin{aligned} T_{EW} &= 0,0012 \times C_w \times V_w^2 \\ &= 0,0012 \times 1,3 \times 30^2 \\ &= 1,40 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Dengan asumsi tinggi kendaraan 2 m dan jarak antara roda kendaraan 1,75 m, maka besarnya beban angin yang ditransfer ke lantai jembatan adalah

$$\begin{aligned} Q_{EW} &= \left[\frac{1}{2} \times \frac{h}{x} \times T_{EW} \right] \times 2 \\ &= \left[\frac{1}{2} \times \frac{2}{1,75} \times 1,40 \right] \times 2 \\ &= 1,6 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Dimana:

x = jarak antara roda kendaraan

h = tinggi kendaraan

b. Beban Pejalan Kaki (TP)

Untuk pembebanan pejalan kaki, trotoar direncanakan dengan tebal 25 cm dan lebar 130 cm, maka beban hidup yang dipikul areal trotoar adalah sebesar 5 kpa (RSNI T-02-2005 Pasal 6.9).

Panjang total jembatan = 150 m

Jumlah trotoar = 1 buah (kiri) pada 1 *box girder*

Luas areal yang dibebani pejalan kaki:

$$\begin{aligned} A &= \text{Lebar trotoar} \times \text{Panjang total jembatan} \times \text{jumlah trotoar} \\ &= 1,3\text{m} \times 150 \text{ m} \times 1 \\ &= 195 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan ada peraturan RSNI T-02-2005 (Pasal 6.9, Gambar 10 Pembebanan untuk pejalan kaki) diperoleh:

$A > 100 \text{ m}^2$, maka beban nominal sebesar 2 kPa.

Dari ketentuan tersebut diatas maka untuk areal seluas 195 m^2 akan menghasilkan beban nominal pejalan kaki sebesar:

$$2 \text{ kPa} = 200 \text{ kg/m}^2 = \frac{200 \text{ kg/m}}{1,3 \text{ m}} = 153 \text{ kg/m} = 0,153 \text{ T/m} = 1,53 \text{ KN/m}$$

Hasil dari perhitungan beban tersebut akan dibebankan pada gelagar utama jembatan.

c. Beban Gempa

Gaya gempa vertikal pada balok dihitung dengan menggunakan percepatan vertikal ke bawah sebesar 0,1 dengan $g = 9,81 \text{ m/det}$.

Gaya gempa vertikal rencana:

$$T_{EQ} = 0,10 \times W_T \quad (4.3)$$

Dimana:

W_T = berat total struktur yang berupa berat sendiri dan beban tambahan.

$$\text{Berat sendiri } \textit{box girder prestress} (P_{MS}) = 206,5 \text{ kN/m}$$

$$\text{Beban mati tambahan } (P_{MA}) = 2,265 \text{ T/m} = 22,65 \text{ kN/m}$$

$$\text{Panjang bentang yang ditinjau } (L) = 50 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} W_T &= (P_{MS} + P_{MA}) \times L \\ &= (206,5 + 22,65) \times 50 \\ &= 11412,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{EQ} &= 0,10 \times W_T \\ &= 0,10 \times 11412,5 \\ &= 1141,25 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beban gempa vertikal:

$$Q_{EQ} = \frac{T_{eq}}{L} = \frac{1141,25}{50} = 22,825 \text{ kN/m}$$

Resume Pembebanan Yang Terjadi Pada *Box Girder*

1. Berat sendiri *box girder*

$$P_{MS} = 206,5 \text{ kN/m} = 20,65 \text{ T/m}$$

2. Beban mati tambahan

$$P_{MA} = 22,65 \text{ kN/m} = 2,265 \text{ T/m}$$

3. Beban Lajur "D"

• Beban Terbagi Rata (BTR)

$$q_{BTR} = 43,2 \text{ kN/m}$$

• Beban Garis Terpusat (BGT)

$$q_{BGT} = 410,865 \text{ kN/m}$$

4. Beban angin (T_{EW})

$$T_{EW} = 1,4 \text{ kN/m}$$

5. Beban pejalan kaki (T_{TP})

$$(T_{TP}) = 1,53 \text{ kN/}$$

6. Beban gempa (T_{EQ})

$$T_{EQ} = 22,825 \text{ kN/m}$$

Kombinasi beban untuk pembebanan jembatan ini berdasarkan pada RSNI T-02-2005 yaitu sebagai berikut:

1. $(P_{MS} + P_{MA}) + (BTR + BGT)$
2. $(P_{MS} + P_{MA}) + (BTR + BGT) + (TP)$
3. $(P_{MS} + P_{MA}) + (BTR + BGT) + (EW)$
4. $(P_{MS} + P_{MA}) + (EQ)$

Dimana:

P_{MS} = berat sendiri *box girder*

P_{MA} = beban mati tambahan

BTR = beban merata tersebar beban lajur

BGT = beban garis terpusat beban lajur

TP = beban pejalan kaki

EW = beban angin

EQ = beban gempa

Berikut adalah hasil serta gambar dari momen pembebanan dengan bantuan program SAP 2000 v.11:

1. Momen beban sendiri = 18640,21 kN/m
2. Momen beban mati tambahan = 4172,221 kN/m
3. Momen beban terbagi rata (BTR) = 3171 kN/m
4. Momen beban garis terpusat (BGT) = 9102,258 kN/m
5. Momen pejalan kaki = 1182,464 kN/m
6. Momen gaya angin = 1221,665 kN/m
7. Momen gaya gempa = 3133,853 kN/m

4.2. Gaya Prestress, Eksentrisitas Dan Jumlah Tendon

4.2.1. Gaya Prestress

Kondisi awal (saat transfer)

- Mutu beton ($f'c$) = 49,8 Mpa.

Kuat tekan beton pada saat transfer

$$f_{ci} = 80\% \times f'c$$

$$f_{ci} = 80\% \times 49,8$$

$$f_{ci} = 39,84 \text{ Mpa}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur menurut SNI T-12-2004

Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$f_{cc} = 0,6 \times f_{ci}$$

$$f_{cc} = 0,6 \times 39,84$$

$$f_{cc} = 23,9 \text{ Mpa}$$

Tarik

$$f_{ct} = 0,25 \times \sqrt{39,84}$$

$$f_{ct} = 0,25 \times \sqrt{39,84}$$

$$f_{ct} = 0,95 \text{ Mpa}$$

Letak titik berat terhadap sisi bawah profil *box girder*, $Y_b = 1,59 \text{ m}$.
Direncanakan jarak titik berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* adalah, $Z_o = 0,20 \text{ m}$.

Eksentrisitas Tendon, $e_s = Y_b - Z_o = 1,59 - 0,20 = 1,39 \text{ m}$

Tahanan momen sisi atas: $W_a = 12,6 \text{ m}^3$

Tahanan momen sisi bawah: $W_b = 7,2 \text{ m}^3$

M_T = momen maksimum pada seluruh bentang akibat beban sendiri
 $= 18640,21 \text{ kN/m} = 18640,21 \times 10^6 \text{ Nm}$

- Tegangan pada Serat atas

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e x Y_t}{I} - \frac{M_t x Y_t}{I}$$

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e}{W_a} - \frac{M_t}{W_a}$$

$$0,95 = -\frac{F_o}{8,26 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1390}{12,6 \times 10^9} - \frac{18640,21 \times 10^6}{12,6 \times 10^9}$$

$$F_o = 10509450 \text{ N}$$

- Tegangan pada serat bawah

$$f_{cc} = \frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e}{W_b} - \frac{M_t}{W_b}$$

$$23,9 = \frac{F_o}{8,26 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1390}{7,2 \times 10^9} - \frac{18640,21 \times 10^6}{7,2 \times 10^9}$$

$$F_o = 84354450 \text{ N}$$

Gaya *jacking* yang menentukan adalah gaya F_o pada serat bawah (tekan) yaitu $F_o = 84354450 \text{ N} = 84354,45 \text{ kN}$.

Baja pratekan direncanakan menggunakan kabel jenis *strand seven wiresstrees relieved*. Dengan mengacu pada Tabel ASTM A-416 berikut adalah jenis dan karakteristik dari baja pratekan yang digunakan:

- Jenis *strand*: *Uncoated 7 wire superstrand* ASTM A-416 grade 270.
- Diameter = 15,2 mm.
- Luas nominal penampang *strand* (A_s) = 140 mm².
- Nominal massa = 1,102 kg/m.
- Beban putus minimal satu *strand* (P_{bs}): 260,7 kN (100% UTS atau 100% beban putus).

Jumlah *strand* yang diperlukan n_s

$$n_s = \frac{F_o}{P_{bs}} = \frac{84354,45}{260,7} = 324 \text{ strand}$$

Jumlah kawat untaian (*strand cable*) untuk tiap tendon adalah 22 kawat untaian tiap tendon.

Digunakan jumlah *strand* sebagai berikut:

n_{t1} = 8 tendon masing-masing 22 *strand*/tendon. Jumlah tendon n_{s1} = 176 *strands*

n_{t2} = 8 tendon masing-masing 22 *strand*/tendon. Jumlah tendon n_{s2} = 176 *strands*

Jumlah tendon $n_t = n_{t1} + n_{t2} = 8 + 8 = 16$ tendon

Jumlah strands $n_s = n_{s1} + n_{s2} = 216 + 216 = 352 \text{ strands}$

Beban satu *strands*:

$$P_{bs1} = \frac{F_o}{n_s} = \frac{84354,45}{352} = 239,6 \text{ kN}$$

Persentase tegangan yang timbul pada baja (% *jacking force*)

$$p_o = \frac{F_o}{n_t \times P_{bs}} = \frac{84354,45}{16 \times 260,7} = 20,22\% < 85\% \dots\dots\dots\text{Ok! (sesuai pasal$$

4.4.3.2.2.RSNI-T-12-2004)

Gaya *prestrees* yang terjadi akibat *jacking*:

$$P_j = p_o \times n_s \times P_{bs1} = 0,2022 \times 352 \times 239,6 = 17056,04 \text{ kN}$$

Kondisi akhir (saat service)

Diperkirakan kehilangan tegangan (*loss of prestress*) = 25%

Gaya *prestress* akhir setelah kehilangan tegangan (*loss of prestress*) sebesar 25%:

$$P_{\text{eff}} = (100\% - 25\%) \times P_j = 75\% \times 17056,04 = 12792,03 \text{ kN}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur pada saat *service* menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$f_{cc} = 0,45 \times f'c$$

$$f_{cc} = 0,45 \times 49,8$$

$$f_{cc} = 22,41 \text{ MPa}$$

Tarik

$$f_{ct} = 0,5 \times \sqrt{f'c}$$

$$f_{ct} = 0,5 \times \sqrt{49,8}$$

$$f_{ct} = 3,53 \text{ Mpa}$$

Momen-momen yang terjadi akibat pembebanan (berdasarkan perhitungan momen dengan program SAP 2000 v. 11, detailnya terdapat pada lampiran).

1. Momen akibat berat sendiri

$$M_{MS} = 18640,21 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

2. Momen akibat beban mati tambahan

$$M_{MA} = 4172,221 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

3. Momen akibat beban lajur "D"

$$M_{TD} = 12273,371 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

- Tegangan di serat atas

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e}{W_a} - \frac{M (MS+MA)}{W_a} - \frac{MTD}{W_a}$$

$$3,53 = -\frac{F_o}{8,26 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1390}{12,6 \times 10^9} - \frac{(18640,21 \times 10^6) + (4172,221 \times 10^6)}{12,6 \times 10^9} - \frac{12273,371 \times 10^6}{12,6 \times 10^9}$$

$$F_o = 27307970 \text{ N}$$

- Tegangan di serat bawah

$$f_{cc} = \frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e}{W_b} - \frac{M (MS+MA)}{W_b} - \frac{MTD}{W_b}$$

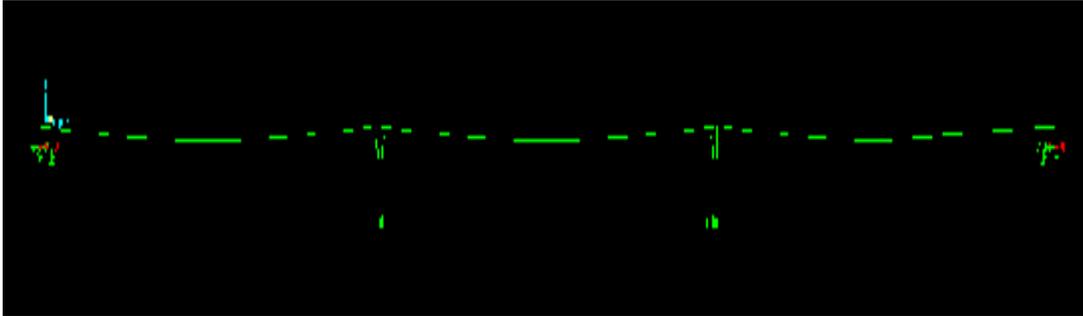
$$22,41 = \frac{F_o}{8,26 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1390}{7,2 \times 10^9} - \frac{(18573,748 \times 10^6) + (4105,763 \times 10^6)}{7,2 \times 10^9} - \frac{12140,503 \times 10^6}{7,2 \times 10^9}$$

$$F_o = 86865070 \text{ N}$$

Gaya yang menentukan adalah gaya F_o yang terjadi pada serat bawah yaitu:

$$F_o = 86865070 \text{ Newton} = 86865,07 \text{ kN.}$$

4.2.2. Posisi tendon



Gambar 4.4: Posisi tendon di dalam *box girder*.

$$e_s = 1390 \text{ mm}^2 = 1,39 \text{ m}$$

$$e_s' = y_a - 0,25 \text{ m} = 0,91 - 0,25 = 0,66 \text{ m}$$

Kurva parabolic dari jalur tendon tersebut dapat ditentukan dengan persamaan parabolic, yaitu:

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

- Bagian 1 (0 – 37,5 m)

$$e_s = 1,44 \text{ m}$$

$$F(0,0)$$

$$a(0)^2 + b(0) + c = 0$$

$$c = 0$$

$$f(18,75 ; -1,44)$$

$$a(18,75)^2 + b(18,75) + c = -1,44$$

$$351,5625 a + 18,75 b = -1,44 \quad (1)$$

$$f(37,5 ; 0)$$

$$a(37,5)^2 + b(37,5) + c = 0$$

$$1406,25 a + 37,5 b = 0 \quad (2)$$

Dengan eliminasi persamaan 1 dan 2 maka akan dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$F(x) = 0,00409x^2 - 0,1536x$$

- Bagian 2 (37,5 m – 62,5 m)

$$e_s' = 0,61 \text{ m}$$

$$F(0 ; 0,61)$$

$$a(0)^2 + b(0) + c = 0,61$$

$$c = 0,61$$

$$f(-12,5 ; 0)$$

$$a(-12,5)^2 + b(-12,5) + c = 0$$

$$156,25 a - 12,5 b + 0,61 = 0 \quad (1)$$

$$f(12,5 ; 0)$$

$$a(12,5)^2 + b(12,5) + c = 0$$

$$156,25 a + 12,5 b + 0,61 = 0 \quad (2)$$

Dengan eliminasi persamaan 1 dan 2 maka akan dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$F(x) = -0,0078x^2 + 0,0488x + 0,61$$

- Bagian 3 (62,5 m – 93,75 m)

$$e_s = 1,44 \text{ m}$$

$$F(0,0)$$

$$a(0)^2 + b(0) + c = 0$$

$$c = 0$$

$$f(18,75 ; -1,44)$$

$$a(18,75)^2 + b(18,75) + c = 0$$

$$351,5625 a + 18,75 b = -1,44 \quad (1)$$

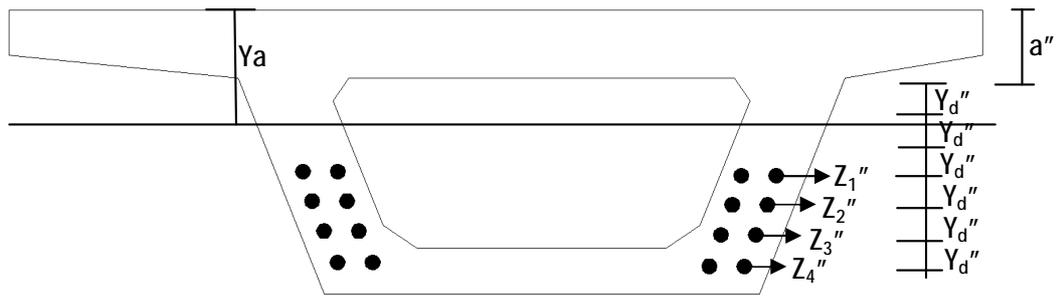
$$f(37,5 ; 0)$$

$$a(37,5)^2 + b(37,5) + c = 0$$

$$1406,25 a + 37,5 b = 0 \quad (2)$$

Dengan eliminasi persamaan 1 dan 2 maka akan dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$F(x) = 0,00409x^2 - 0,0823x$$



$$Z_1'' = a'' + 5 Y_d'' = 0,66 + 5 (0,2) = 1,66 \text{ m}$$

$$Z_2'' = a'' + 6 Y_d'' = 0,66 + 6 (0,2) = 1,86 \text{ m}$$

$$Z_3'' = a'' + 7 Y_d'' = 0,66 + 7 (0,2) = 2,06 \text{ m}$$

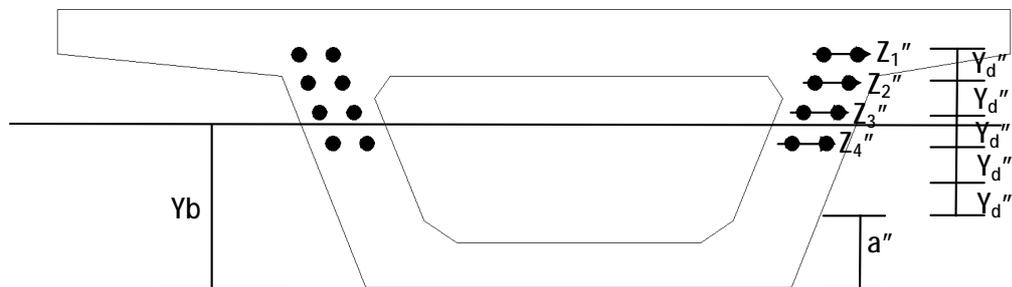
$$Z_4'' = a'' + 8 Y_d'' = 0,66 + 8 (0,2) = 2,26 \text{ m}$$

$$Z_a'' = a'' = 0,66 \text{ m}$$

- Posisi tendon pada bagian akhir (150 m)

Tetapkan $Y_d'' = 0,2 \text{ m}$

$$a'' = Y_b - 1,25 Y_d'' = 1,59 - (1,25 \times 0,2) = 1,34 \text{ m}$$



Jarak masing-masing tendon terhadap alas:

$$Z_1'' = a'' + 5 Y_d'' = 1,34 + 5 (0,2) = 2,34 \text{ m}$$

$$Z_2'' = a'' + 4 Y_d'' = 1,34 + 4 (0,2) = 2,14 \text{ m}$$

$$Z_3'' = a'' + 3 Y_d'' = 1,34 + 3 (0,2) = 1,94 \text{ m}$$

$$Z_4'' = a'' + 2 Y_d'' = 1,34 + 2 (0,2) = 1,74 \text{ m}$$

$$Z_a'' = a'' = 1,34 \text{ m}$$

Setelah dilakukan pemodelan tendon pada program SAP 2000 v.11, maka diperoleh nilai masing-masing posisi tendon dalam *box girder* adalah sebagai berikut:

Tabel 4.4: Posisi tendon didalam *box girder*.

Point	X m	Y M	Z m	Tendon Distance m
1	-3.12E-16	-2.55	-0.5	0
2	1.3889	-2.4906	-0.6253	1.3889
3	2.7778	-2.4346	-0.7435	2.7778
4	4.1667	-2.3819	-0.8544	4.1667
5	5.5556	-2.3327	-0.9583	5.5556
6	6.9444	-2.2869	-1.0549	6.9444
7	8.3333	-2.2444	-1.1444	8.3333
8	9.7222	-2.2054	-1.2268	9.7222
9	11.1111	-2.1698	-1.302	11.1111
10	12.5	-2.1375	-1.37	12.5
11	13.8889	-2.1086	-1.4309	13.8889
12	15.2778	-2.0832	-1.4846	15.2778
13	16.6667	-2.0611	-1.5311	16.6667
14	18.0556	-2.0424	-1.5705	18.0556
15	19.4444	-2.0272	-1.6027	19.4444
16	20.8333	-2.0153	-1.6278	20.8333
17	22.2222	-2.0068	-1.6457	22.2222
18	23.6111	-2.0017	-1.6564	23.6111
19	25	-2	-1.66	25
20	26.3889	-2.0017	-1.6564	26.3889
21	27.7778	-2.0068	-1.6457	27.7778
22	29.1667	-2.0153	-1.6278	29.1667
23	30.5556	-2.0272	-1.6027	30.5556
24	31.9444	-2.0424	-1.5705	31.9444
25	33.3333	-2.0611	-1.5311	33.3333
26	34.7222	-2.0832	-1.4846	34.7222
27	36.1111	-2.1086	-1.4309	36.1111
28	37.5	-2.1375	-1.37	37.5
29	38.8889	-2.1698	-1.302	38.8889
30	40.2778	-2.2054	-1.2268	40.2778
31	41.6667	-2.2444	-1.1444	41.6667
32	43.0556	-2.2869	-1.0549	43.0556
33	44.4444	-2.3327	-0.9583	44.4444
34	45.8333	-2.3819	-0.8544	45.8333

Tabel 4.4. *Lanjutan*

Point	X m	Y M	Z m	Tendon Distance m
35	47.2222	-2.4346	-0.7435	47.2222
36	48.6111	-2.4906	-0.6253	48.6111
37	50	-2.55	-0.5	50
38	51.3889	-2.4906	-0.6253	51.3889
39	52.7778	-2.4346	-0.7435	52.7778
40	54.1667	-2.3819	-0.8544	54.1667
41	55.5556	-2.3327	-0.9583	55.5556
42	56.9444	-2.2869	-1.0549	56.9444
43	58.3333	-2.2444	-1.1444	58.3333
44	59.7222	-2.2054	-1.2268	59.7222
45	61.1111	-2.1698	-1.302	61.1111
46	62.5	-2.1375	-1.37	62.5
47	63.8889	-2.1086	-1.4309	63.8889
48	65.2778	-2.0832	-1.4846	65.2778
49	66.6667	-2.0611	-1.5311	66.6667
50	68.0556	-2.0424	-1.5705	68.0556
51	69.4444	-2.0272	-1.6027	69.4444
52	70.8333	-2.0153	-1.6278	70.8333
53	72.2222	-2.0068	-1.6457	72.2222
54	73.6111	-2.0017	-1.6564	73.6111
55	75	-2	-1.66	75
56	76.3889	-2.0017	-1.6564	76.3889
57	77.7778	-2.0068	-1.6457	77.7778
58	79.1667	-2.0153	-1.6278	79.1667
59	80.5556	-2.0272	-1.6027	80.5556
60	81.9444	-2.0424	-1.5705	81.9444
61	83.3333	-2.0611	-1.5311	83.3333
62	84.7222	-2.0832	-1.4846	84.7222
63	86.1111	-2.1086	-1.4309	86.1111
64	87.5	-2.1375	-1.37	87.5
65	88.8889	-2.1698	-1.302	88.8889
66	90.2778	-2.2054	-1.2268	90.2778
67	91.6667	-2.2444	-1.1444	91.6667
68	93.0556	-2.2869	-1.0549	93.0556
69	94.4444	-2.3327	-0.9583	94.4444
70	95.8333	-2.3819	-0.8544	95.8333
71	97.2222	-2.4346	-0.7435	97.2222

Tabel 4.4. Lanjutan

Point	X m	Y M	Z m	Tendon Distance m
72	98.6111	-2.4906	-0.6253	98.6111
73	100	-2.55	-0.5	100
74	101.3889	-2.4906	-0.6253	101.3889
75	102.7778	-2.4346	-0.7435	102.7778
76	104.1667	-2.3819	-0.8544	104.1667
77	105.5556	-2.3327	-0.9583	105.5556
78	106.9444	-2.2869	-1.0549	106.9444
79	108.3333	-2.2444	-1.1444	108.3333
80	109.7222	-2.2054	-1.2268	109.7222
81	111.1111	-2.1698	-1.302	111.1111
82	112.5	-2.1375	-1.37	112.5
83	113.8889	-2.1086	-1.4309	113.8889
84	115.2778	-2.0832	-1.4846	115.2778
85	116.6667	-2.0611	-1.5311	116.6667
86	118.0556	-2.0424	-1.5705	118.0556
87	119.4444	-2.0272	-1.6027	119.4444
88	120.8333	-2.0153	-1.6278	120.8333
89	122.2222	-2.0068	-1.6457	122.2222
90	123.6111	-2.0017	-1.6564	123.6111
91	125	-2	-1.66	125
92	126.4706	-2.0324	-1.5918	126.4706
93	127.9412	-2.0647	-1.5235	127.9412
94	129.4118	-2.0971	-1.4553	129.4118
95	130.8824	-2.1294	-1.3871	130.8824
96	132.3529	-2.1618	-1.3188	132.3529
97	133.8235	-2.1941	-1.2506	133.8235
98	135.2941	-2.2265	-1.1824	135.2941
99	136.7647	-2.2588	-1.1141	136.7647
100	138.2353	-2.2912	-1.0459	138.2353
101	139.7059	-2.3235	-0.9776	139.7059
102	141.1765	-2.3559	-0.9094	141.1765
103	142.6471	-2.3882	-0.8412	142.6471
104	144.1176	-2.4206	-0.7729	144.1176
105	145.5882	-2.4529	-0.7047	145.5882
106	147.0588	-2.4853	-0.6365	147.0588
107	148.5294	-2.5176	-0.5682	148.5294
108	150	-2.55	-0.5	150

4.3. Analisa Kehilangan Gaya Prategang

Gaya prategang pada beton mengalami proses reduksi yang progresif (pengurangan secara berangsur-angsur) sejak gaya prategang awal diberikan, sehingga tahapan gaya prategang perlu ditentukan pada setiap tahanan pembebanan, yaitu dari tahapan transfer gaya prategang ke beton sampai ke berbagai tahapan prategang yang terjadi pada kondisi beban kerja hingga mencapai kondisi ultimit. Pada dasarnya nilai masing-masing kehilangan gaya prategang adalah kecil, tetapi apabila dijumlahkan dapat menyebabkan penurunan gaya *jacking* yang signifikan, yaitu 15% - 20%, sehingga kehilangan gaya prategang harus dipertimbangkan. Beberapa hal yang harus diperhatikan untuk meminimalkan kehilangan gaya prategang adalah:

1. Mutu beton yang digunakan, minimal 40 MPa untuk memperkecil rangkai.
2. Tendon yang digunakan adalah mutu tinggi yang memiliki relaksasi rendah.

Secara umum, reduksi gaya prategang dapat dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu:

1. Kehilangan elastis langsung (segera) yang terjadi pada saat proses pabrikan atau konstruksi, termasuk perpendekan (deformasi) beton secara elastis, kehilangan karena pengakuran dan kehilangan karena gesekan.
2. Kehilangan yang bergantung pada waktu, seperti rangkai, susut dan kehilangan akibat efek temperatur dan relaksasi baja, yang semuanya dapat ditentukan pada kondisi limit tegangan akibat beban kerja di dalam beton prategang.

4.3.1. Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Langsung

4.3.1.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Perpendekan Beton Secara Elastis (ES).

Pada struktur yang menggunakan kabel tunggal, tidak ada kehilangan gaya prategang akibat perpendekan beton, karena gaya pada kabel diukur setelah perpendekan terjadi. Pada penampang yang menggunakan lebih dari satu kabel, kehilangan gaya prategang ditentukan oleh kabel yang pertama ditarik dan memakai harga setengahnya untuk mendapatkan rata-rata semua kabel. Kehilangan

gaya prategang pada struktur pasca tarik dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$ES = \Delta f_c = \frac{n P_i}{A_c}$$

Dimana:

f_c = tegangan pada penampang

P_i = gaya prategang awal

$$f_c = \frac{P_{bs}}{A_{st}} = \frac{260,7 \times 10^3}{140} = 1862,14 \text{ Mpa}$$

$$ES_1 = \frac{352 \times 260,7 \times 10^3}{8,26 \times 10^6} = 11,109 \text{ Mpa}$$

Kehilangan rata-rata gaya prategang:

$$ES = 0,5 \times ES_1 = 0,5 \times 11,109 = 5,5545 \text{ Mpa}$$

Sehingga persentase kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis adalah:

$$\% ES = \frac{5,5545}{1862,14} \times 100\% = 0,29\%$$

4.3.1.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Pada Tendon (Ps)

Berdasarkan SNI 03-2847-2002, kehilangan gaya prategang akibat friksi pada tendon pasca tarik dapat dihitung dengan rumus:

$$P_s = P_o^{(K L_x + \mu \alpha)}$$

Dimana:

P_o = Gaya *prestress* yang terjadi akibat gaya *jacking* = 1705,604 kN

K = Koefisien Wooble
= 0,0020 (Tabel 14 pasal 20.6 SNI 03-2847-2002)

L_x = Panjang kabel yang ditinjau = 50 m

μ = Koefisien friksi = 0,20 (Tabel 14 pasal 20.6 SNI 03-2847-2002)

α = Perubahan sudut akibat pengaruh kelengkungan

$$= \frac{8 y}{x} \text{ rad} = \frac{8 \times 1,390}{50} = 0,2224 \text{ rad}$$

Maka, $K L_x + \mu \alpha = 0,0020 \times 50 + 0,20 \times 0,2224 = 0,1445 < 0,3$

Sehingga didapat,

$$P_s = P_o^{(1 + K L x + \mu \alpha)} = 17056,04^{(1 + 0,1445)} = 69724,37 \text{ kN}$$

Maka, kehilangan tegangan yang terjadi adalah:

$$\begin{aligned} \% \text{ loss} &= \frac{P_s - P_o}{P_o} \times 100\% \\ &= \frac{69724,37 - 17056,04}{17056,04} \times 100\% \\ &= 3,08 \% \end{aligned}$$

$$\Delta f_{ps} = \% \text{ loss} \times \text{teg. } \textit{Ultimit strand} = 3,08\% \times 1862,14 = 57,35 \text{ Mpa}$$

4.3.1.3. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Slip Pada Angkur (ANC)

Kehilangan gaya prategang ini terjadi pada saat transfer gaya pendongkrak ke angkur. Tarikan mesin pendongkrak akan mendorong baji masuk kedalam konus dan setelah *jacking* dilepas, kabel akan menarik baji lebih rapat kedalam konus. Panjang atau besar slip tergantung pada tipe baji dan tegangan pada kawat tendon. Harga rata-rata panjang slip akibat pengangkuran adalah 2,5 mm, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$ANC = \Delta L = \frac{f_c}{E_s} \times L$$

Dimana:

$$f_c = \text{tegangan pada penampang} = 1862,14 \text{ Mpa}$$

$$E_s = \text{modulus elastisitas baja tendon} = 200.000 \text{ Mpa}$$

$$\Delta L = \frac{f_c}{E_s} \times L = \frac{1862,14}{200000} \times 50000 = 465,64 \text{ mm}$$

Dengan rata-rata tiap slip 2,5 mm, maka persentase kehilangan gaya prategang akibat slip angkur adalah:

$$ANC = \frac{2,5}{465,64} \times 100\% = 0,536 \%$$

Maka, besarnya kehilangan prategang yang terjadi adalah

$$\Delta f_{ANC} = 0,536\% \times 1862,14 = 9,98 \text{ Mpa}$$

4.3.2. Kehilangan Gaya Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu

4.3.2.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Rangkak Beton (CR)

Prategang yang terus menerus pada beton suatu batang prategang dapat mengakibatkan rangkak pada beton yang secara efektif mengurangi tegangan pada baja bermutu tinggi. Kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkak dapat ditentukan dengan dua cara, yaitu cara regangan rangkak batas dan cara koefisien rangkak. Dengan koefisien rangkak, besarnya kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkak dapat ditentukan dengan mengacu pada rumus seperti berikut:

$$CR = K_{CR} \frac{E_s}{E_c} (f_{ci} - f_{cd})$$

Dimana:

K_{cr} = Koefisien rangkak = 2,0 untuk pratarik dan 1,6 untuk pasca tarik

E_c = Modulus elastisitas beton saat umur beton 28 hari

E_s = Modulus elastisitas baja prategang

f_{cs} = Tegangan pada beton pada level pusat baja segera setelah transfer

f_{cd} = Tegangan pada beton akibat beban mati tambahan setelah prategang diberikan

n = Rasio modulus (E_s/E_c)

E_c = 39074,5 Mpa

E_s = 200000 Mpa

$$f_{ci} = - \frac{Pi}{Ac} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{MDe}{Ic}$$

A_c = $8,26 \times 10^6 \text{ mm}^2$

I_c = $5,54 \times 10^{12} \text{ mm}^4$

E = 1390 mm

$$r^2 = \frac{Ic}{Ac} = \frac{5,54 \times 10^{12}}{8,26 \times 10^6} = 0,67 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

M_D = Momen maksimum akibat beban sendiri = $18640,21 \times 10^6 \text{ Nmm}$

$P_i = 0,75 \times f_{pu} \times A_{ps} = 0,75 \times 1862,14 \times 49280 = 68824694,4 \text{ N}$

$$\begin{aligned}
f_{ci} &= -\frac{Pi}{Ac} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{MDe}{Ic} \\
&= -\frac{68824694,4}{8,26 \times 10^6} \left(1 + \frac{1390^2}{(0,67 \times 10^6)^2}\right) + \frac{(18640,21 \times 10^6) \times 1390}{5,54 \times 10^{12}} \\
&= 3,65 \text{ Mpa}
\end{aligned}$$

M_{MA} = Momen akibat beban mati tambahan = 4172,221 kN = 4172,221 x 10⁶ Nmm

$$f_{cd} = \frac{MMA \cdot e}{Ic} = \frac{4172,221 \times 10^6 \times 1390}{5,54 \times 10^{12}} = 1,04 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned}
CR &= K_{CR} \frac{Es}{Ec} (f_{ci} - f_{cd}) \\
&= 1,6 \frac{200000}{39074,5} (3,65 - 1,04) = 21,37 \text{ Mpa}
\end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{CR}{fc} \times 100\% = \frac{25,18}{1862,14} \times 100\% = 1,15 \%$$

4.3.2.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Beban Susut Beton (SH)

Seperti halnya pada rangkai beton, besarnya susut pada beton dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, tipe perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan.

Untuk komponen struktur pasca tarik, kehilangan prategang akibat susut agak lebih kecil karena sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pasca tarik. Besarnya kehilangan prategang akibat susut pada beton dapat dihitung dengan rumus:

$$SH = \epsilon_{CS} E_s$$

Dimana:

$$E_s = \text{modulus elastisitas baja prategang} = 200.000 \text{ Mpa}$$

$$\epsilon_{CS} = \text{regangan susut sisa total dengan harga:}$$

$$\epsilon_{CS} = 300 \times 10^{-6} \text{ untuk struktur pratarik}$$

$$\epsilon_{CS} = \frac{200 \times 10^{-6}}{\log(t+2)} \text{ untuk struktur pasca tarik, dengan } t \text{ adalah usia beton pada}$$

waktu transfer prategang dalam hari

$$\epsilon_{CS} = \frac{200 \times 10^{-6}}{\log(7+2)} = 0,0002096$$

$$\begin{aligned}
SH &= \varepsilon_{CS} E_s \\
&= 0,0002096 \times 200000 \\
&= 41,92 \text{ Mpa}
\end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{41,92}{1862,14} \times 100\% = 2,25\%$$

4.3.2.3. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Baja (RE)

Akibat perpendekan elastis (kehilangan gaya prategang seketika setelah peralihan) dan gaya prategang yang tergantung waktu, CR dan SH ada pengurangan berkelanjutan pada tegangan beton, jadi kehilangan gaya prategang akibat relaksasi berkurang. Sebenarnya balok prategang mengalami perubahan regangan baja yang konstan di dalam tendon bila terjadi rangkai yang tergantung pada nilai waktu. Oleh karena itu, ACI memberikan perumusan untuk kehilangan gaya prategang dimana nilai dari K_{RE} , J dan C tergantung dari jenis dan tipe tendon, dimana untuk *strand* atau kawat *stress* yang dipakai adalah *relieved* derajat 1.745 Mpa. Adapun perumusan tersebut yaitu:

$$RE = C \{K_{RE} - J (SH + CR + ES)\}$$

Dimana:

K_{RE} = koefisien relaksasi = 138 Mpa (Tabel 4-5 T.Y.Lin, hal 90)

J = faktor waktu = 0,1 (Tabel 4-5 T.Y.Lin, hal 90)

C = faktor relaksasi = 1 (Tabel 4-5 T.Y.Lin)

SH = kehilangan tegangan akibat susut

CR = kehilangan tegangan akibat rangkai

ES = kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis

$$\begin{aligned}
RE &= C \{K_{RE} - J (SH + CR + ES)\} \\
&= 1 \{138 - 0,1 (41,92 + 21,37 + 5,5545)\} \\
&= 131,12 \text{ Mpa}
\end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{130,67}{1862,14} \times 100\% = 7,04 \%$$

Resume kehilangan tegangan yang terjadi adalah:

1. Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis (ES) = 0,29%
2. Kehilangan tegangan akibat gesekan tendon (Ps) = 3,08%
3. Kehilangan tegangan akibat slip ankur (ANC) = 0,536%
4. Kehilangan tegangan akibat rangkai beton (CR) = 1,15%
5. Kehilangan tegangan akibat susut beton (SH) = 2,25%
6. Kehilangan tegangan akibat relaksasi baja (RE) = 7,04%

Persentase kehilangan gaya prategang keseluruhan adalah:

$$\begin{aligned}\Delta f_{pT} &= ES + Ps + ANC + CR + SH + RE \\ &= 0,29\% + 3,08\% + 0,536\% + 1,15\% + 2,25\% + 7,04\% \\ &= 14,166\%\end{aligned}$$

Pada perencanaan awal, kehilangan tegangan pada beton prategang sebesar 25%. Sehingga hasil dari estimasi perencanaan kehilangan tegangan yang telah di analisa yaitu:

$$14,166\% < 25\% \text{ (maka perencanaan ini dinyatakan OK!)}$$

4.4. Tegangan Yang Terjadi Akibat Gaya *Prestress*

Berdasarkan peraturan SNI 03-2947-2002, tegangan beton sesaat setelah penyaluran gaya *prestress* (sebelum terjadi kehilangan tegangan sebagai fungsi waktu) tidak boleh melampaui nilai berikut:

1. Tegangan serat tekan terluar harus $\leq 0,60 f'_{ci}$
2. Tegangan serat tarik terluar harus $\leq 0,25 \sqrt{f'_{ci}}$
3. Tegangan serat tarik terluar pada ujung-ujung komponen struktur di atas perletakan sederhana harus $\leq 0,5 \sqrt{f'_{ci}}$

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

1. Tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, beban mati, dan beban hidup tetap $\leq 0,45 f'_{ci}$
2. Tegangan serat tarik terluar yang pada awalnya mengalami tekan $\leq 0,5 \sqrt{f'_{ci}}$

Keadaan Awal (Saat Transfer)

Mutu beton *prestress*: K-600

Kuat tekan beton (f^c) = $0,83 \times K \times 100 = 0,83 \times 600 \times 100 = 49800$ kPa

Kuat tekan beton pada keadaan awal (saat *transfer*),

$f'_{ci} = 0,80 \times f^c = 0,80 \times 49800 = 39840$ kPa

Tegangan ijin beton tekan:

$0,60 \times f'_{ci} = 0,60 \times 39840 = 23904$ kPa

Tegangan ijin beton tarik:

$0,25 \times \sqrt{f'_{ci}} = 0,25 \times \sqrt{39840} = 49,90$ kPa

Gaya prategang awal $P_t = 84354,45$ kN

Momen maksimum akibat beban sendiri:

$M_{bs} = 18640,21$ kNm

$W_a = 12,6$ m³

$W_b = 7,2$ m³

Luas penampang (A) = $8,26$ m²

$e_s = 1,39$ m

Maka,

Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{Pt}{A} + \frac{Pt \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a}$$

$$f_a = - \frac{84354,45}{8,26} + \frac{84354,45 \times 1,39}{12,6} - \frac{18640,21}{12,6}$$

$f_a = - 2386$ kPa

Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{Pt}{A} - \frac{Pt \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b}$$

$$f_b = \frac{84354,45}{8,26} - \frac{84354,45 \times 1,39}{7,2} + \frac{18640,21}{7,2}$$

$f_b = -3483,8$ kPa

$f_b \leq 0,60 f'_{ci} = 3483,8 \leq 23904$ (OK!)

Keadaan Setelah Loss of Prestress

Mutu beton *prestress*: K-600

Kuat tekan beton ($f'c$) = 49800 kPa

Tegangan ijin beton tekan:

$$0,45 \times f'c = 0,45 \times 49800 = 22410 \text{ kPa}$$

Tegangan ijin beton tarik:

$$0,5 \times \sqrt{f'c} = 0,5 \times \sqrt{49800} = 11157,95 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{eff}} = (100 - \% \text{loss total}) \times P_j = (100 - 14,336\%) \times 17056,04 = 14610,89 \text{ kN}$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

Momen maksimum akibat beban sendiri: $M_{bs} = 18640,21 \text{ kNm}$

Maka,

Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{\text{eff}}}{A} + \frac{P_{\text{eff}} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a}$$
$$f_a = - \frac{14610,89}{8,26} + \frac{14610,89 \times 1,39}{12,6} - \frac{18640,21}{12,6}$$

$$f_a = - 1636,4 \text{ kPa}$$

Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{\text{eff}}}{A} - \frac{P_{\text{eff}} \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b}$$
$$f_b = \frac{1702592,58}{8,26} - \frac{1702592,58 \times 1,39}{7,2} + \frac{18640,21}{7,2}$$

$$f_b = -1537,08 \text{ kPa}$$

Kontrol: $f_a \leq 0,45 f'c = 1636,4 \leq 22410$ (OK!)

4.5. Tegangan Pada Box Girder Akibat Beban

a. Akibat beban sendiri

$$M_{MS} = 18640,21 \text{ kNm}$$

$$A = 8,26 \text{ m}^2$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = -\frac{M_{MS}}{W_a} = -\frac{18640,21}{12,6} = -1479,38 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{MS}}{W_b} = \frac{18640,21}{7,2} = 2588,92 \text{ kN/m}^2$$

b. Abibat beban mati tambahan

$$M_{MA} = 4172,221 \text{ kNm}$$

$$A = 8,26 \text{ m}^2$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = -\frac{M_{MA}}{W_a} = -\frac{4172,221}{12,6} = -331,13 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{MA}}{W_b} = \frac{4172,221}{7,2} = 579,48 \text{ kN/m}^2$$

c. Akibat beban pejalan kaki (TP)

$$M_{TP} = 1182,464 \text{ kNm}$$

$$A = 8,26 \text{ m}^2$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = -\frac{M_{TP}}{W_a} = -\frac{1182,464}{12,6} = -93,85 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{TP}}{W_b} = \frac{1182,464}{7,2} = 164,21 \text{ kN/m}^2$$

d. Akibat gaya angin

$$M_{TEW} = 1221,665 \text{ kNm}$$

$$A = 8,26 \text{ m}^2$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = -\frac{M_{TEW}}{W_a} = -\frac{1221,665}{12,6} = -96,96 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{TEW}}{W_b} = \frac{1221,665}{7,2} = 169,68 \text{ kN/m}^2$$

- e. Akibat beban gempa (EQ)

$$M_{TEQ} = 3133,853 \text{ kNm}$$

$$A = 8,26 \text{ m}^2$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = -\frac{M_{TEQ}}{W_a} = -\frac{3133,853}{12,6} = -248,72 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{TEQ}}{W_b} = \frac{3133,853}{7,2} = 435,26 \text{ kN/m}^2$$

- f. Akibat beban terbagi rata (BTR)

$$M_{BTR} = 3171,113 \text{ kNm}$$

$$A = 8,26 \text{ m}^2$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = -\frac{M_{BTR}}{W_a} = -\frac{3171,113}{12,6} = -251,68 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{BTR}}{W_b} = \frac{3171,113}{7,2} = 440,43 \text{ kN/m}^2$$

g. Akibat beban garis terpusat (BGT)

$$M_{BGT} = 9102,258 \text{ kNm}$$

$$A = 8,26 \text{ m}^2$$

$$W_a = 12,6 \text{ m}^3$$

$$W_b = 7,2 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = -\frac{M_{BGT}}{W_a} = -\frac{9102,258}{12,6} = -722,40 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{BGT}}{W_b} = \frac{9102,258}{7,2} = 1264,2 \text{ kN/m}^2$$

h. Akibat susut beton

Besar gaya internal akibat susut beton dapat dinyatakan dengan:

$$P_S = A_{\text{plat}} \times E_c \times \Delta \varepsilon_{\text{su}} \times \left(\frac{1 - e^{-ef}}{cf} \right)$$

$$A_{\text{plat}} = (B_1 + B_2) \times t_1 = (6,5 + 2) \times 0,6 = 5,1 \text{ m}^2$$

$$E_c = \text{modulus elastisitas beton saat umur beton 28 hari} \\ = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{49,8} = 33167484 \text{ kPa}$$

$$e = \text{bilangan natural} = 2,7183$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{su}} = \text{regangan dasar susut}$$

Berdasarkan panduan RSNI T-12-2004 (Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan) pasal 4.4.1.8 Tabel 4.4-1, regangan susut untuk beton 49,8 Mpa adalah 0,000153, cf = koefisien rangkai maksimum menurut RSNI T-12-2004 (Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan) pasal 4.4.1.9 Tabel 4.4-2, koefisien rangkai maksimum untuk beton 49,8 Mpa adalah 2,0.

Maka, gaya *internal* akibat susut beton adalah:

$$P_S = A_{\text{plat}} \times E_c \times \Delta \varepsilon_{\text{su}} \times \left(\frac{1 - e^{-cf}}{cf} \right)$$

$$P_S = 5,1 \times 33167484 \times 0,000153 \times [(1 - 2,7183^{-2}) / 2] = 11189,04 \text{ kN}$$

Tegangan akibat susut yang terjadi:

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{Ps}{A_{plat}} + \frac{Ps}{A} - \frac{Ps \times e'}{Wa}$$

$$f_a = - \frac{11189,04}{5,1} + \frac{11189,04}{8,26} - \frac{11189,04 \times 1,39}{12,6} = - 2073,7 \text{ kPa}$$

- Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{Ps}{A} + \frac{Ps \times e'}{Wa}$$

$$f_b = \frac{11189,04}{8,26} + \frac{11189,04 \times 1,39}{12,6} = 2588,95 \text{ kPa}$$

i. Tegangan akibat rangkai beton

Besarnya tegangan akibat rangkai beton (menurut peraturan NAASRA *bridge design specification*) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Sigma_{cr} = (1 - e^{-cf}) (\sigma_2 - \sigma_1)$$

σ_1 = tegangan *service* akibat berat sendiri

σ_2 = tegangan *service* akibat beban sendiri dan beban mati tambahan

cf = koefisien rangkai maksimum = 2,0

e = bilangan natural = 2,7183

Tegangan *service* akibat beban sendiri (σ_1):

- Tegangan beton di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{Wa} - \frac{M_{MS}}{Wa}$$

$$f_a = - \frac{14610,89}{8,26} + \frac{14610,89 \times 1,39}{12,6} - \frac{18640,21}{12,6} = - 1636,4 \text{ kPa}$$

- Tegangan beton di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{Wb} - \frac{M_{MS}}{Wb}$$

$$f_b = \frac{14610,89}{8,26} + \frac{14610,89 \times 1,39}{7,2} - \frac{18573,748}{7,2} = 2000,67 \text{ kPa}$$

Tegangan *service* akibat beban sendiri dan beban mati tambahan (σ_2):

- Tegangan beton di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times es}{W_a} - \frac{M_{MS} + M_{MA}}{W_a}$$

$$f_a = - \frac{14610,89}{8,26} + \frac{14610,89 \times 1,39}{12,6} - \frac{18640,21 + 4172,221}{12,6} = - 1967,5 \text{ kPa}$$

- Tegangan beton di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times es}{W_b} - \frac{M_{MS} + M_{MA}}{W_b}$$

$$f_b = \frac{14610,89}{8,26} + \frac{14610,89 \times 1,39}{7,2} - \frac{18573,748 + 4172,221}{7,2} = 1421,19 \text{ kPa}$$

Maka, tegangan akibar rangkai beton adalah:

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = [(1 - e^{-c_f}) (\sigma_2 - \sigma_1)] = [(1 - 2,7183^{-2})(1967,5 - 1636,4)] = 286,4 \text{ kPa}$$

- Tegangan di serat bawah:

$$f_b = [(1 - e^{-c_f}) (\sigma_2 - \sigma_1)] = [(1 - 2,7183^{-2})(1421,19 - 2000,67)] = -501,25 \text{ kPa}$$

j. Akibat prategang

Gaya prategang efektif (P_{eff}) = **14610,89** kN dengan eksentrisitas tendon

(es) = 1,39 m

Luas penampang *box girder prestress* (A) = 8,26 m²

W_a = 12,6 m³

W_b = 7,2 m³

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times es}{W_a}$$

$$f_a = - \frac{14610,89}{8,26} + \frac{14610,89 \times 1,39}{12,6} = - 157,04 \text{ kPa}$$

- Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times es}{W_b}$$

$$f_b = \frac{14610,89}{8,26} - \frac{14610,89 \times 1,39}{7,2} = -1051,84 \text{ kPa}$$

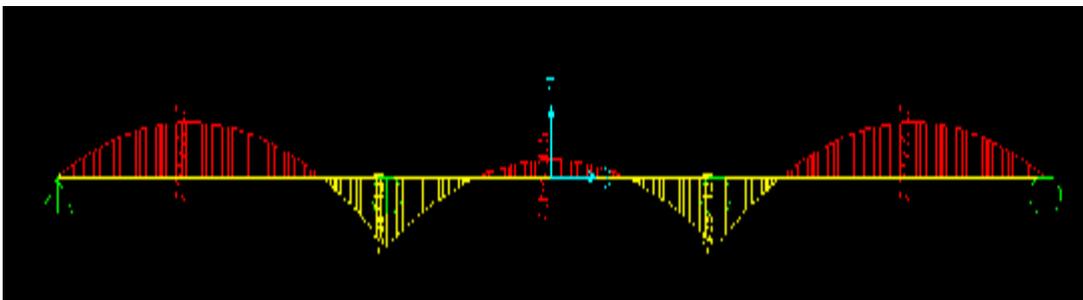
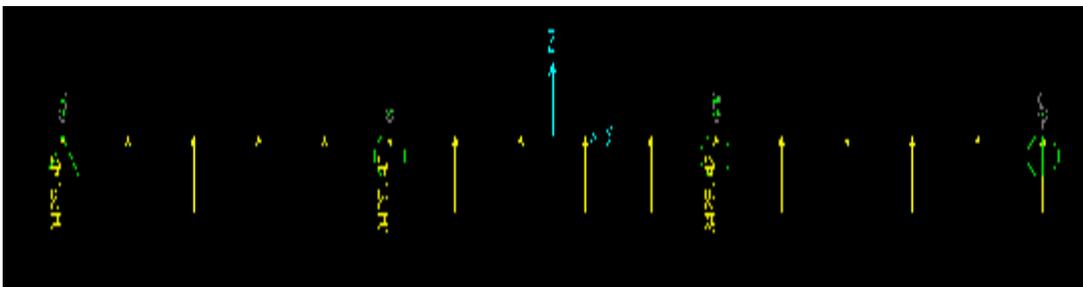
4.6. Metode Beban Ekivalen

Beban penyeimbang (qb)

- Untuk bentang 50 m

$$q_b = \frac{8 \times P_{eff} \times e_s}{L^2} = \frac{8 \times 14610,89 \times 1,39}{50^2} = 64,989 \text{ kN/m}$$

$$FEM = \frac{q_b \times L^2}{12} = \frac{64,989 \times 50^2}{12} = 13429,42 \text{ kNm}$$



Gambar 4.5: Momen yang terjadi pada jembatan setelah diberi beban ekivalen.

4.7. Kontrol Tegangan Kombinasi Pembebanan Terhadap Beban Layan

Mutu beton K-600, kuat tekan beton $f'_c = 49800$ kPa

Tegangan ijin tekan beton, $f_{si} = 0,45 f'_c = 22410$ kPa

Tegangan ijin tekan beton, $f_{bi} = 0,5 \sqrt{f'_c} = 11157,95$ kPa

Kombinasi pembebanan untuk tegangan ijin:

Tabel 4.5: Kombinasi tegangan

Aksi / beban	Simbol	Kombinasi Pembebanan			
		1	2	3	4
a. Aksi tetap					
Berat sendiri	BS	0	0	0	0
Beban mati tambahan	MA	0	0	0	0
Susut beton	SH	0	0	0	0
Rangkak beton	CR	0	0	0	0
Prategang	PR	0	0	0	0
b. Aksi transien					
Beban terbagi rata	BTR	0	0	0	
Beban garis terpusat	BGT	0	0	0	
Beban pejalan kaki	TP		0		
c. Aksi lingkungan					
Beban angin	EW			0	
Beban gempa	EQ				0

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi I

Tabel 4.6: Tegangan kombinasi I

Teg	Berat sendiri	Beb. mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	BTR	BGT	Total kombinasi
f_a	-1479.38	-331.13	-2,074	286.4	-157.04	-251.68	-722.4	-4728.9
f_b	2588.92	579.48	2,589	-501.25	-1051.84	440.43	1264.2	5908.89

Keterangan: $f_a < 0,45 f'_c$ (OK!) ; $f_b < 0,5 \sqrt{f'_c}$ (OK!)

Cek: $-4728,9 < 22410$; $5908,89 < 11157,95$ (OK!)

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi II

Tabel 4.7: Tegangan kombinasi II

Teg	Berat sendiri	Beb. mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	BTR	BGT	Pejalan kaki	Total kombinasi
f_a	-1479.4	-331.13	-2,074	286.4	-157.04	-251.68	-722.4	-93.85	-4822.8
f_b	2588.92	579.48	2,589	-501.25	-1051.8	440.43	1264.2	164.21	6073.1

Keterangan: $f_a < 0,45 f'c$ (OK!) ; $f_b < 0,5\sqrt{f'c}$ (OK!)
 Cek: $-4822,8 < 22410$; $6073,1 < 11157,95$ (OK!)

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi III

Tabel 4.8: Tegangan kombinasi III

Teg	Berat sendiri	Beb. mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	BTR	BGT	Beban angin	Total kombinasi
f_a	-1479.4	-331.13	-2,074	286.4	-157.04	-251.68	-722.4	-96.96	-4825.9
f_b	2588.92	579.48	2,589	-501.25	-1051.8	440.43	1264.2	169.68	6078.57

Keterangan: $f_a < 0,45 f'c$ (OK!) ; $f_b < 0,5\sqrt{f'c}$ (OK!)
 Cek: $-4825,9 < 22410$; $6078,57 < 11157,95$ (OK!)

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi IV

Tabel 4.9: Tegangan kombinasi IV

Teg.	Berat sendiri	Beb. Mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	Beban gempa	Total kombinasi
f_a	-1479.4	-331.13	-2,074	286.4	-157.04	-248.72	-4003.6
f_b	2588.92	579.48	2,589	-501.25	-1051.8	435.26	4639.52

Keterangan: $f_a < 0,45 f'c$ (OK!) ; $f_b < 0,5\sqrt{f'c}$ (OK!)
 Cek: $-4003,6 < 22410$; $4639,52 < 11157,95$ (OK!)

4.8. Perhitungan Penulangan *Box Girder*

Data-data penampang *box girder* adalah:

Slab atas bagian tengah	$B_1 = 5,3$ meter
	$t_1 = 0,6$ meter
Slab bagian tepi	$B_2 = 2$ meter
	$B_3 = 1,2$ meter
	$t_2 = 0,4$ meter
Tinggi <i>box girder</i>	$H = 2,5$ meter
Dinding tepi	$t_4 = 0,6$ meter
Slab bawah	$B_4 = 3,8$ meter
	$t_3 = 0,4$ meter
Penebalan pada pertemuan slab dan dinding	$X = 0,2$ meter
	$Y = 0,2$ meter

4.8.1. Pelat Dinding

Tebal pelat dinding (t_4) = 600 mm

Digunakan tulangan (D) = 22 mm

$b_w = 1000$ mm

Beton *dacking* = 40 mm

$$dx = 600 - 40 - \frac{22}{2} = 549 \text{ mm}$$

$f'c = 49,8$ Mpa

$f_y = 400$ Mpa

$\emptyset = 0,8$

Direncanakan $\rho = 0,0025$

$$\begin{aligned} A_s &= \rho \times b \times d \\ &= 0,0025 \times 1000 \times 549 \\ &= 1372,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan RSNI T-02-2004 (Perencanaan struktur beton untuk jembatan), pasal 5.1.1.5 diperlukan tulangan minimum sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{\sqrt{f'c}}{4 f_y} b_w \cdot d \\ &= \frac{\sqrt{49,8}}{4 \times 400} \times 1000 \times 549 \\ &= 2421,4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dan tidak lebih kecil dari:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{1,4}{f_y} b_w d \\ &= \frac{1,4}{400} \times 1000 \times 549 \\ &= 1921,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$A_s (1372,5) < A_{s \text{ min}} (2421,4)$, maka $A_{s \text{ min}}$ yang menentukan dalam pengambilan tulangan utama. Maka digunakan tulangan D 29 – 150 ($A_s = 2835 \text{ mm}^2$).

Tulangan pembagi:

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{0,18 \times b \times h}{100} \\ &= \frac{0,18 \times 1000 \times 600}{100} \\ &= 1080 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka untuk tulangan bagi digunakan tulangan D 13 – 100 ($A_s = 1327 \text{ mm}^2$).

4.8.2. Pelat Bawah

Tebal pelat bawah (t_3) = 400 mm

Digunakan tulangan (D) = 22 mm

$b_w = 1000 \text{ mm}$

Beton *dacking* = 40 mm

$$d_x = 400 - 40 - \frac{22}{2} = 349 \text{ mm}$$

$f'c = 49,8 \text{ Mpa}$

$f_y = 400 \text{ Mpa}$

$\emptyset = 0,8$

Direncanakan $\rho = 0,0025$

$$\begin{aligned} A_s &= \rho \times b \times d_x \\ &= 0,0025 \times 1000 \times 349 \\ &= 872,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan RSNI T-02-2004 (Perencanaan struktur beton untuk jembatan), pasal 5.1.1.5 diperlukan tulangan minimum sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{\sqrt{f'c}}{4 f_y} b_w d \\ &= \frac{\sqrt{49,8}}{4 \times 400} \times 1000 \times 349 \\ &= 1539,3 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dan tidak boleh lebih kecil dari:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{1,4}{f_y} b_w \cdot d \\ &= \frac{1,4}{400} 1000 \times 349 \\ &= 1221,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$A_s (872,5) < A_{s \text{ min}} (1539,3)$, maka $A_{s \text{ min}}$ yang menentukan dengan pengambilan tulangan utama. Maka digunakan tulangan D 16 – 100 ($A_s = 2011 \text{ mm}^2$).

Tulangan pembagi:

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{0,18 \times b \times h}{100} \\ &= \frac{0,18 \times 1000 \times 400}{100} \end{aligned}$$

$$= 720 \text{ mm}^2$$

Maka untuk tulangan bagi digunakan tulangan D 10 – 100 ($A_s = 785,4 \text{ mm}^2$)

4.8.3. Pelat Atas

Tebal plat dinding (t_1) = 600 mm

Digunakan tulangan (D) = 22 mm

$b_w = 1000 \text{ mm}$

Beton *dacking* = 25 mm

$$dx = 600 - 40 - \frac{22}{2} = 549 \text{ mm}$$

$f'_c = 49,8 \text{ Mpa}$

$f_y = 400 \text{ Mpa}$

$\emptyset = 0,8$

- **Momen yang terjadi pada slab atas**

1. Berat sendiri

Ditinjau slab lantai jembatan selebar 5,3 m, dengan tebal 0,60 m.

Berat beton bertulang adalah $w_c = 25 \text{ kN/m}^3$

Maka, berat sendiri $Q_{MS} = b \times h \times w_c = 530 \times 0,6 \times 25 = 79,5 \text{ kN/m}$

Momen akibat berat sendiri adalah

$$M_{MS} = \frac{1}{12} \times Q_{MS} \times s^2 = \frac{1}{12} \times 79,5 \times 3,3^2 = 72,15 \text{ kN/m}$$

2. Beban mati tambahan

Beban mati tambahan terdiri dari lapisan aspal dengan tebal 0,05 m dengan berat jenis $9,8 \text{ kN/m}^3$ dan air hujan dengan asumsi tebal 0,05 dengan berat jenis $9,8 \text{ kN/m}^3$. Maka diperoleh beban mati tambahan:

$$Q_{MA} = 1,590 \text{ kN/m}$$

Maka timbul momen pada slab sebesar:

$$M_{MA} = \frac{1}{12} \times Q_{MS} \times s^2 = \frac{1}{12} \times 1,590 \times 3,3^2 = 1,443 \text{ kN/m}$$

3. Beban truk

Diperhitungkan jembatan akan memikul beban truk dengan roda ganda yang besarnya 100 kN dengan factor beban dinamis (FBD) = 0,375. Maka beban truk:

$$P_{TT} = (1 + FBD) \times T = 137,5 \text{ kN}$$

Momen maksimum yang terjadi:

$$M_{TT} = \frac{1}{8} \times P_{TT} \times s = \frac{1}{8} \times 137,5 \times 3,3 = 56,72 \text{ kN/m}$$

4. Beban angin

Dengan koefisien seret $C_w = 1,3$ dengan kecepatan angin rencana 30 m/s^2 , maka besar beban angin:

$$T_{EW} = 0,0012 \times C_w \times V_w^2 = 0,0012 \times 1,3 \times 30^2 = 1,404 \text{ kN}$$

Diasumsikan tinggi kendaraan yang ditiup angin $h = 2 \text{ m}$ dan jarak roda $x = 1,75 \text{ m}$.

Maka transfer beban angin ke lantai jembatan:

$$P_{EW} = \frac{1}{2} \times \frac{h}{x} \times T_{EW} = \frac{1}{2} \times \frac{2}{1,75} \times 1,404 = 0,82 \text{ kN}$$

Maka momen yang terjadi akibat beban angin:

$$M_{EW} = \frac{1}{8} \times P_{EW} \times s = \frac{1}{8} \times 0,82 \times 3,3 = 0,338 \text{ kN/m}$$

Total momen pada slab atas box girder adalah $M_u = 130,651 \text{ kNm}$

Faktor reduksi untuk komponen lentur $\phi = 0,8$

$$\rho_b = \frac{(\beta_1 \times 0,85 \times \frac{f'_c}{f_y} \times 600 - (0,013 \times 0,85 \times \frac{49800}{240} \times 600))}{600 + f_y} = \frac{(0,013 \times 0,85 \times \frac{49800}{240} \times 600)}{600 + 240} = \mathbf{1,64}$$

$$R_{max} = 0,75 \times \rho_b \times f_y \left[\left(\frac{1 - \frac{1}{2} \times 0,75 \times \rho_b \times f_y}{0,85 \times f'_c} \right) \right] = 1,022$$

Momen nominal rencana, $M_n = M_u / \phi = 130,651 / 0,8 = 163,3 \text{ kNm}$

Factor tahanan momen nominal,

$$R_n = \frac{M_n \times 10^{-3}}{b \times d^2} = \frac{163,3 \times 10^{-3}}{b \times d^2} = 0,1633 \text{ (} R_n < R_{max} \text{) OK!}$$

Rasio tulangan yang dibutuhkan:

$$\rho = 0,85 \times \frac{f'_c}{f_y} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0,85 \times f'_c}} \right] = 0,173$$

$$\rho_{min} = 25\% \frac{1,4}{f_y} = 0,00145$$

$$A_s = \rho \times b \times d$$

$$= 0,00145 \times 1000 \times 549$$

$$= 796,05 \text{ mm}^2$$

Maka, digunakan tulangan D13 – 100 ($A_s = 1327 \text{ mm}^2$)

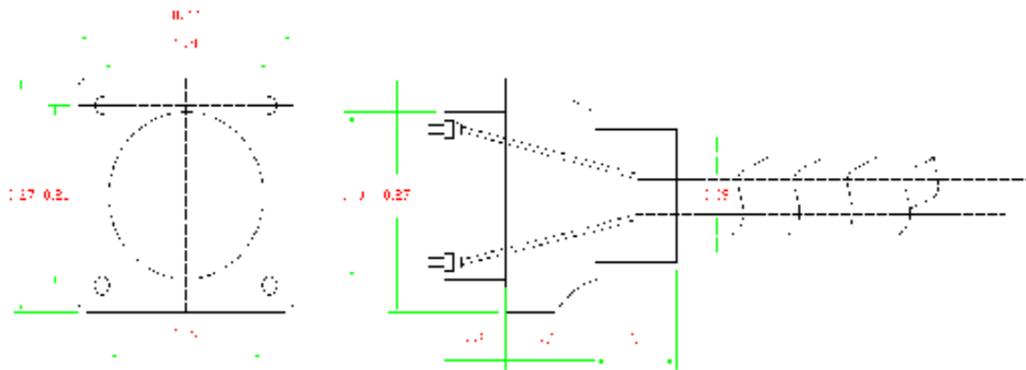
Tulangan pembagi:

$$A_s = \frac{0,18 \times b \times x}{100} = \frac{0,18 \times 1000 \times 600}{100} = 720 \text{ mm}^2$$

Maka, tulangan bagi yang digunakan adalah D13 – 100 ($A_s = 1327 \text{ mm}^2$)

4.9. Perencanaan *End Block*

Untuk daerah tumpuan digunakan angkur tipe VSL dengan rincian sebagai berikut:



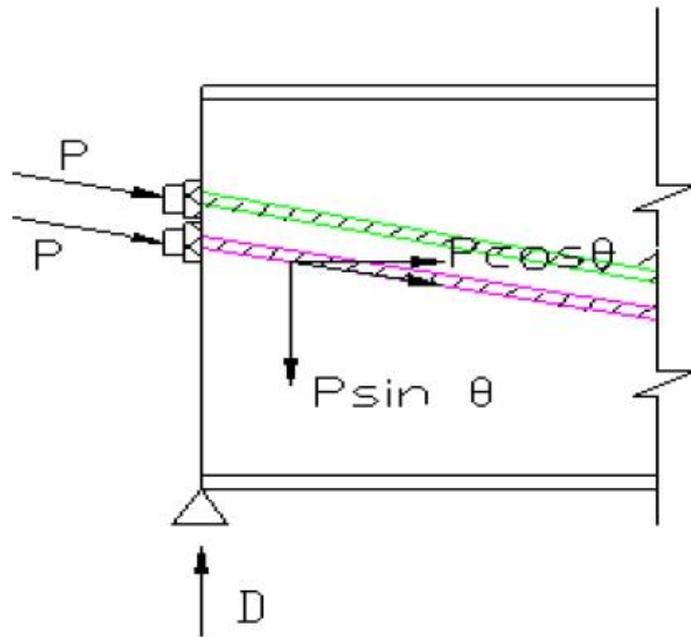
Gambar 4.6: Angkur hidup VSL *type 22 Sc*.

Masing-masing tendon terdiri dari 22 – D 15,2 mm *strand*.

Tegangan *ultimit strands* = 1862,14 Mpa

Diameter selubung = 90 mm

Mutu beton saat penarikan = 48 Mpa



Persamaan kabel: $F(x) = 0,00409x^2 - 0,1536x$

$$dy/dx = 0,00818x - 0,1536$$

$$\theta = A \tan (dy/dx)$$

$$X = 37,5 \text{ m}$$

$$\theta = 3080 \tan (0,15315)$$

$$= 8,2^\circ$$

Tegangan tumpu di bawah pelat angkat:

Gaya vertical yang bekerja pada masing-masing pelat angkat pada saat penarikan:

$$P \sin \theta = 22 \times 90 \times 0,85 \times 1862,14 \times \sin 8,2^\circ = 446,99 \text{ kN}$$

$D = 6094,0308 \text{ kN}$ (gaya geser akibat pembebanan dengan menggunakan program SAP v.11, detailnya terdapat pada lampiran).

Maka:

$$D_{\text{total}} = P \sin \theta + D$$

$$D_{\text{total}} = 446,99 + 6094,0308 = 6541,021 \text{ kN}$$

Luas bersih pelat angkat:

$$A = 270 \times 270 - \frac{\pi \times 210^2}{4}$$

$$= 35606,5 \text{ mm}^2$$

$$f_t = \frac{P}{A} = \frac{13082,042 \times 10^3}{35606,5} = 367,41 \text{ Mpa}$$

Gaya tarik melintang:

Karena posisi kedua pelat angkur berdekatan, maka kedua gaya pelat tersebut dapat digabungkan sehingga:

$$P = 2 \times 6541,021 \text{ kN} = 13082,042 \text{ kN}$$

Gaya P gabungan ini bekerja pada pelat angkur yang mempunyai lebar 270 mm dan tinggi 270 mm, sehingga:

$$T = 0,25 \sum P \times \left(1 - \frac{a}{h}\right)$$

$$T = 0,25 \times 1308,042 \times \left(1 - \frac{270}{2500}\right)$$

$$T = 2917,3 \text{ kN}$$

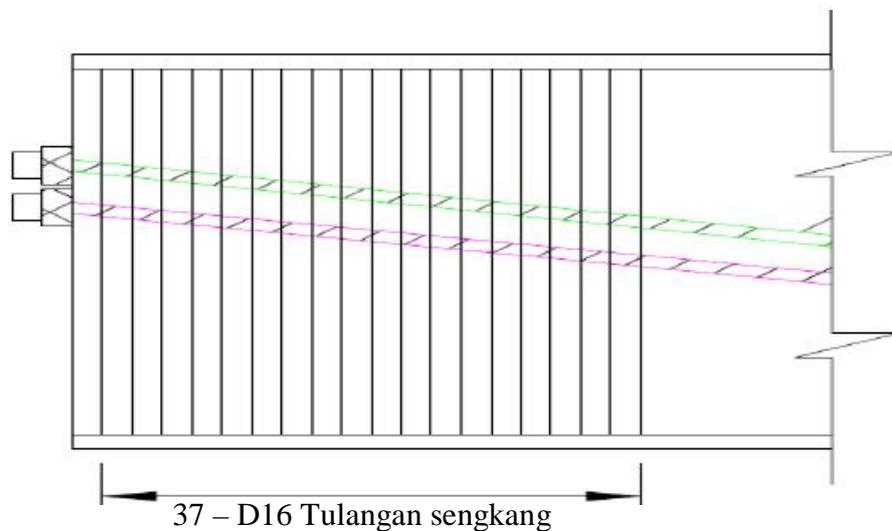
Kebutuhan tulangan melintang:

Luas tulangan yang dibutuhkan untuk menjaga agar tegangan yang terjadi pada tulangan lebih kecil dari pada 0,5 fy.

$$A_s = \frac{T}{0,5 f_y} = \frac{2917,3 \times 10^3}{0,5 \times 400} = 14586,5 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan sengkang tertutup D 16 ($A = 201 \text{ mm}^2$) sehingga jumlah sengkang yang dibutuhkan adalah:

$$n = \frac{14586,5}{201 \times 2} = 37 \text{ sengkang}$$



Gambar 4.7: Pembesian pada *End Block*.

4.10. Perencanaan Dimensi *Box Girder*

4.10.1. *Box Girder Type Twin Cellular*

Struktur utama jembatan menggunakan profil *box girder prestress* dengan tipe *twin cellular* dengan lebar total 17 m, yang terbagi menjadi 3 bentang dengan masing-masing bentang berjarak 50 m. Jembatan ini disangga oleh 2 pilar dan 2 abutmen. Perencanaan dimensi *box girder* yang digunakan didapat dari cara *trial and error*, dan berdasarkan peraturan dan ketentuan yang berlaku.

Adapun pedoman dalam pemilihan tampang tampang melintang gelagar diberikan oleh Podolny & Muller (1982), sebagai berikut:

1. Lebar jembatan dan jarak web

Untuk gelagar kotak tunggal, lebar jembatan tidak lebih dari 12 m.

a. Jarak web: 4 – 7,5 m

b. Panjang bagian kantilever: sampai dengan 1/4 lebar gelagar

2. Tebal sayap atas

Tebal minimum untuk sayap atas yang digunakan berdasarkan panjang bentang antar web, yaitu:

Tabel 4.10: Ketentuan sayap atas profil *box girder*

Bentang antar web	Tebal minimum sayap atas
Kurang dari 3 m	175 mm
Antara 3 – 4,5 m	200 mm
Antara 4,5 – 7,5 m	250 mm
Lebih dari 7,5m	Digunakan sistem rib atau <i>hollow slab</i>

3. Tebal web

Tebal web minimum adalah sebagai berikut:

a. 200 mm, jika tidak terdapat tendon pada web.

b. 250 mm, jika terdapat *duck* kecil baik vertikal maupun longitudinal.

c. 300 mm, jika digunakan tendon dengan *strand* 12,5 mm.

d. 350 mm, jika tendon di angkur pada web.

4. Tebal sayap bawah

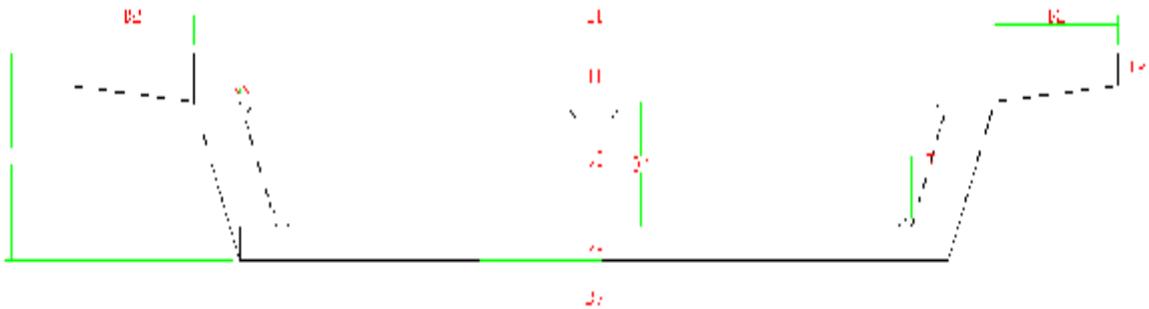
a. 175 mm, jika *duck* tidak diletakkan pada sayap.

b. 200 – 250 mm, jika *duck* diletakkan pada sayap.

5. Rasio tinggi terhadap bentang

Rasio tinggi terhadap bentang adalah $1/15 < h/L < 1/30$.

Berdasarkan pedoman di atas dipilih potongan melintang gelagar jembatan seperti gambar berikut:

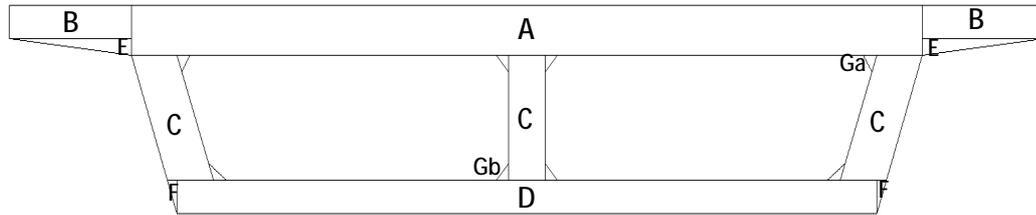


Gambar 4.8: Potongan melintang profil gelagar jembatan.

Tabel 4.11: Dimensi profil melintang *box girder*.

Slab atas bagian tengah	$B_1 = 13$ meter
	$t_1 = 0,6$ meter
Slab bagian tepi	$B_4 = 1,5$ meter
	$t_3 = 0,6$ meter
Tinggi <i>box girder</i>	$H = 2,5$ meter
	$t_4 = 0,6$ meter
Dinding tepi	$B_3 = 11$ meter
	$t_5 = 0,4$ meter
Slab bawah	$X = 0,2$ meter
	$Y = 0,2$ meter
Penebalan pada pertemuan slab dan dinding	$X = 0,2$ meter
	$Y = 0,2$ meter

Perhitungan Section Properties Box Girder Prestress.



Gambar 4.9: Bagian section properties pada gelagar jembatan.

Tabel 4.12: Perhitungan properties section box girder prestress.

Section Properties	b (m)	H (m)	Bentuk	pias	Luas Tampang (m ²)	Y (m)	Statis Momen A*Y (m ³)	Ya	Yb	Inersia Momen (m ⁴)
A	13	0,6	Persegi	1	7,80	0,3	2,34	0,99	1,51	3,90
B	2	0,4	Persegi	2	1,60	0,2	0,32			1,00
C	0,6	1,5	Persegi	3	2,70	1,35	3,65			0,52
D	11	0,4	Persegi	1	4,40	2,3	10,12			7,64
E	2	0,2	Segitiga	2	0,40	0,5	0,2			0,05
F	0,2	0,4	Segitiga	2	0,08	2,3	0,184			0,07
Ga	0,2	0,2	Segitiga	4	0,04	0,7	0,056			0,003
Gb	0,2	0,2	Segitiga	4	0,04	2	0,16			0,07
Total					17,06		16,84			13,18

Dimana:

b = lebar

h = tinggi

y = jarak titik berat pias ke serat atas

ya = jarak terhadap alas = $\frac{\sum A \cdot y}{\sum A}$

yb = H - Ya

Momen inersia = $[\frac{1}{36} \times b \times h^3] + [\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2]$ untuk bentuk segitiga

= $[\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2]$ untuk bentuk persegi

Analisa data:

$$\begin{aligned}
 A. I &= [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2] \\
 &= [\frac{1}{12} \times 13 \times 0,6^3] + [7,80 \times (0,3 - 0,99)^2] \\
 &= 3,92
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{B. I} &= \left[\frac{1}{12} \times b \times h^3\right] + [A \times (y - ya)^2] \\
&= \left[\frac{1}{12} \times 2 \times 0,4^3\right] + [1,60 \times (0,2 - 0,99)^2] \\
&= 1,00
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{C. I} &= \left[\frac{1}{12} \times b \times h^3\right] + [A \times (y - ya)^2] \\
&= \left[\frac{1}{12} \times 0,6 \times 1,5^3\right] + [2,70 \times (1,35 - 0,99)^2] \\
&= 0,52
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{D. I} &= \left[\frac{1}{12} \times b \times h^3\right] + [A \times (y - ya)^2] \\
&= \left[\frac{1}{12} \times 11 \times 0,4^3\right] + [4,40 \times (2,3 - 0,99)^2] \\
&= 7,64
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{E. I} &= \left[\frac{1}{12} \times b \times h^3\right] + [A \times (y - ya)^2] \\
&= \left[\frac{1}{12} \times 2 \times 0,2^3\right] + [0,40 \times (0,5 - 0,99)^2] \\
&= 0,05
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{F. I} &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3\right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2\right] \\
&= \left[\frac{1}{36} \times 0,2 \times 0,4^3\right] + \left[\frac{1}{2} \times 0,08 \times (2,3 - 0,99)^2\right] \\
&= 0,07
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Ga. I} &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3\right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2\right] \\
&= \left[\frac{1}{36} \times 0,2 \times 0,2^3\right] + \left[\frac{1}{2} \times 0,08 \times (0,7 - 0,99)^2\right] \\
&= 0,003
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Gb. I} &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3\right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2\right] \\
&= \left[\frac{1}{36} \times 0,2 \times 0,2^3\right] + \left[\frac{1}{2} \times 0,08 \times (2 - 0,99)^2\right] \\
&= 0,04
\end{aligned}$$

Hasil yang diperoleh:

$$\text{Jumlah luas penampang (A)} = 17,06 \text{ m}^2$$

$$\text{Jumlah statis momen (A*Y)} = 16,84 \text{ m}^3$$

$$\text{Jumlah inersia momen } I_o = 13,18 \text{ m}^4$$

Perhitungan Letak Titik Berat

Tinggi *box girder prestress* (H) = 2,5 m

Luas penampang *box girder prestress* (A) = 17,06 m²

Letak titik berat:

$$Y_a = \frac{\sum A \cdot Y}{\sum A} = \frac{16,84}{17,06} = 0,99 \text{ m}$$

$$Y_b = H - Y_a = 2,5 - 0,99 = 1,51 \text{ m}$$

Perhitungan momen tahanan (modulus penampang)

$$\begin{aligned} \text{Momen inersia terhadap alas balok: } I_b &= \sum A \times Y^2 + \sum I_o \\ &= 29,85 \text{ m}^4 + 13,18 \text{ m}^4 \\ &= 43,03 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Momen inersia terhadap titik berat balok:

$$\begin{aligned} I_x &= I_b - A \times Y_b^2 \\ &= 43,03 \text{ m}^4 - (17,06 \text{ m}^2 \times 1,51) \\ &= 17,23 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Momen tahanan sisi atas:

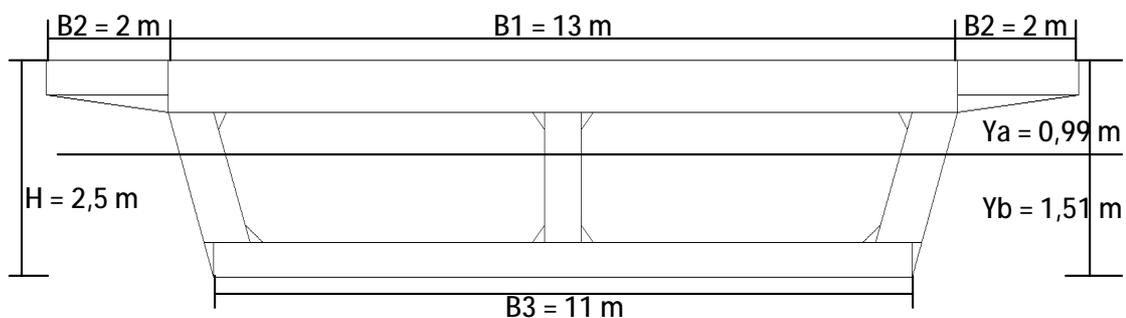
$$W_a = \frac{I_x}{Y_a} = \frac{17,23}{0,99} = 17,4 \text{ m}^3$$

Momen tahanan sisi bawah:

$$W_b = \frac{I_x}{Y_b} = \frac{17,23}{1,59} = 10,8 \text{ m}^3$$

Berat beton *prestress* (Wc) = 2500 kg/m³ = 25 kN/m³ (asumsi)

Berat sendiri *box girder prestress* = A x Wc = 17,06 x 25 = 426,5 kN/m
= 42,65 T/m



Gambar 4.10: Spesifikasi potongan melintang *box girder* yang direncanakan.

4.11. Analisa Pembebanan

1. Aksi Tetap

a. Analisa Berat Sendiri

Perhitungan besarnya momen akibat berat sendiri struktur langsung dihitung dengan sendirinya menggunakan SAP 2000 v.11 dengan mutu beton dan material sesuai dengan peraturan.

Berat sendiri profil *box girder*

$$\text{Berat beton prestress } (W_c) = 2550 \text{ kg/m}^3 = 25,5 \text{ kN/m}^3$$

$$\text{Berat sendiri } \textit{box girder prestress} (P_{MS}) = A \times W_c = 17,06 \times 25,5 = 426,5 \text{ kN/m}$$

b. Analisa Beban Mati Tambahan

- Berat lapisan aspal (*surface*)

$$\begin{aligned} & \text{Tebal aspal} \times \text{lebar lantai kendaraan} \times \text{Bj. Aspal} \\ & = 0,05 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 2200 \text{ kg/m}^3 \\ & = 1540 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

- Berat trotoar

$$\begin{aligned} & \text{Tebal trotoar} \times \text{lebar trotoar} \times \text{Bj. Beton} \times \text{jumlah} \\ & = 0,25 \text{ m} \times 1,3 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^2 \times 2 \\ & = 1560 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

- Berat kerb

$$\begin{aligned} & \text{Tebal kerb} \times \text{lebar kerb} \times \text{Bj. Beton} \times \text{jumlah} \\ & = 0,25 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^2 \times 2 \\ & = 240 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

- Berat tiang sandaran dan penerangan (asumsi)

$$= 250 \text{ kg/m}$$

- Berat air hujan (5 cm)

$$\begin{aligned} & = 0,05 \text{ m} \times 17 \text{ m} \times 1000 \text{ kg/m}^3 \\ & = 850 \text{ kg/m} \end{aligned}$$

$$\text{Total beban mati tambahan } (P_{MA}) = 4440 \text{ kg/m} = 4,44 \text{ T/m} = 44,4 \text{ kN/m}$$

2. Beban Lajur “D”

Untuk perhitungan kekuatan lantai kendaraan atau sistem lantai kendaraan jembatan harus digunakan beban “T”, yaitu beban yang merupakan kendaraan truk yang mempunyai beban roda ganda (*dual wheel load*) sebesar 10 ton.

a. Beban Terbagi Merata (BTR)

Beban terbagi merata dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.12 dan 2.13 yang mengacu pada peraturan RSNI T-02-2005 Pasal 6.3.1 ayat 2. Jadi, dengan bentang jembatan 50 m intensitas beban terbagi merata dapat dihitung dengan menggunakan rumus 2.13 seperti berikut:

$$L \leq 30 \text{ m}; q = 9,0 \text{ kN/m}^2$$

$$L > 30 \text{ m}; q = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kN/m}^2$$

Untuk penyebaran gaya arah melintang $L = 50 \text{ m}$

- Sepanjang 8,5 m:

$$q_{\text{BTR}_{50}} = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{50}\right) \times 8,5 \times 100\% = 61,2 \text{ kN/m}$$

- Sepanjang $(B - 3) - 5 \text{ m} = (17 - 3) - 8,5 = 5,5 \text{ m}$

$$q_{\text{BTR}_{50}} = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{50}\right) \times 5,5 \times 50\% = 19,8 \text{ kN/m}$$

Total beban terbagi merata yang bekerja sepanjang bentang 50 meter adalah:

$$q_{\text{BTR}_{\text{total}}} = 61,2 + 19,8 = 81 \text{ kN/m}$$

b. Beban Garis Terpusat (BGT)

Berdasarkan RSNI T-02-2005 Pasal 6.3.1 ayat 3, beban garis ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas jembatan. Besar intensitas beban garis adalah 49,0 kN/m.

Faktor beban dinamis untuk bentang 50 meter menurut Rumus 2.16 pada RSNI T-02-2005, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{FBD} &= 0,4 - 0,0025 (L - 50) \\ &= 0,4 - 0,0025 (50 - 50) \\ &= 0,3975 \end{aligned}$$

- L = 8,5 meter

$$\begin{aligned} P_{TD} &= 49 \times (1 + \text{FBD}) \times \text{lebar lajur} \times 100\% \\ &= 49 \times (1 + 0,3975) \times 8,5 \times 100\% \\ &= 582,1 \text{ kN} \end{aligned}$$

- L = 5,5 meter

$$\begin{aligned} P_{TD} &= 49 \times (1 + \text{FBD}) \times \text{lebar lajur} \times 50\% \\ &= 49 \times (1 + 0,3975) \times 5,5 \times 50\% \\ &= 188,3 \text{ kN} \end{aligned}$$

Total dari beban garis (BGT) yang diperoleh adalah

$$\begin{aligned} &= P_{TD} 7 \text{ m} + P_{TD} 5 \text{ m} \\ &= 582,1 \text{ kN} + 188,3 \text{ kN} \\ &= 770,4 \text{ kN (terpusat ditengah bentang)} \end{aligned}$$

c. Beban truk “T”

Beban truk “T” adalah sebesar 112,5 kN dengan faktor kejut FBD = 30% untuk bentang 150 m.

$$TU' = 112,5 \times (1 + \text{FBD}) \times \text{load faktor } (K_{TB}^U)$$

$$TU' = 112,5 \times (1 + 0,3) \times 1,8$$

$$TU' = 292 \text{ kN}$$

3. Analisa Beban Dari Aksi Lingkungan

a. Beban Angin

Beban angin pada jembatan merupakan beban merata yang bekerjapada bidang horizontal dan tegak lurus dengan sumbu memanjangjembatan. Beban angin yang bekerja pada gelagar utama jembatan dapatdihitung dengan rumus sebagai berikut:

Apabila suatu kendaraan sedang berada di atas jembatan, beban garis merata tambahan arah horizontal harus diterapkan pada permukaan lantai seperti diberikan dengan rumus:

$$T_{EW} = 0,0012 \times C_w \times V_w^2 \quad (4.2)$$

Dimana:

V_w = kecepatan angin rencana (m/dt) untuk keadaan batas yang ditinjau

C_w = koefisien seret yang besarnya tergantung dari perbandingan dari lebar total jembatan dengan tinggi bangunan atas termasuk tinggi bagian sandaran yang masif (b/d).

Untuk nilai C_w , diperoleh dengan menginterpolasi nilai b/d yang terdapat pada Tabel 27 RSNI T-02-2005.

$$\frac{b}{d} = \frac{17000}{3750} = 4,5$$

Dengan perbandingan b/d sebesar 4,5 maka diperoleh nilai koefisien seret $C_w = 1,3$ (didapat dari hasil interpolasi). Asumsi kecepatan angin rencana adalah 30 m/s (dianggap jembatan berada jauh dari pantai).

$$\begin{aligned} T_{EW} &= 0,0012 \times C_w \times V_w^2 \\ &= 0,0012 \times 1,3 \times 30^2 \\ &= 1,40 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Dengan asumsi tinggi kendaraan 2 m dan jarak antara roda kendaraan 1,75 m, maka besarnya beban angin yang ditranfer ke lantai jembatan adalah

$$\begin{aligned} Q_{EW} &= \left[\frac{1}{2} \times \frac{h}{x} \times T_{EW} \right] \times 2 \\ &= \left[\frac{1}{2} \times \frac{2}{1,75} \times 1,40 \right] \times 2 \\ &= 1,6 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Dimana:

x = jarak antara roda kendaraan

h = tinggi kendaraan

b. Beban Pejalan Kaki (TP)

Untuk pembebanan pejalan kaki, trotoar direncanakan dengan tebal 25 cm dan lebar 130 cm, maka beban hidup yang dipikul areal trotoar adalah sebesar 5 kpa (RSNI T-02-2005 Pasal 6.9).

Panjang total jembatan = 150 m

Jumlah trotoar = 2 buah (kiri dan kanan box girder)

Luas areal yang dibebani pejalan kaki:

$$\begin{aligned} A &= \text{Lebar trotoar} \times \text{Panjang total jembatan} \\ &= 1,3 \text{ m} \times 150 \text{ m} \\ &= 195 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan ada peraturan RSNI T-02-2005 (Pasal 6.9, Gambar 10 Pembebanan untuk pejalan kaki) diperoleh:

$A > 100 \text{ m}^2$, maka beban nominal sebesar 2 kPa.

Dari ketentuan tersebut diatas maka untuk areal seluas 195 m^2 akan menghasilkan beban nominal pejalan kaki sebesar:

$$2 \text{ kPa} = 200 \text{ kg/m}^2 = \frac{200 \text{ kg/m}}{1,5 \text{ m}} = 133,3 \text{ kg/m} = 0,1333 \text{ T/m} = 1,33 \text{ KN/m}$$

Hasil dari perhitungan beban tersebut akan dibebankan pada gelagar utama jembatan.

c. Beban Gempa

Gaya gempa vertikal pada balok dihitung dengan menggunakan percepatan vertikal ke bawah sebesar 0,1 dengan $g = 9,81 \text{ m/det}$.

Gaya gempa vertikal rencana:

$$T_{EQ} = 0,10 \times W_T \quad (4.3)$$

Dimana:

W_T = berat total struktur yang berupa berat sendiri dan beban tambahan.

Berat sendiri *box girder prestress* (P_{MS}) = 426,5 kN/m

Beban mati tambahan (P_{MA}) = 4,44 T/m = 44,4 kN/m

Panjang bentang yang ditinjau (L) = 50 m

$$\begin{aligned} W_T &= (P_{MS} + P_{MA}) \times L \\ &= (426,5 + 44,4) \times 50 \\ &= 23545 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{EQ} &= 0,10 \times W_T \\ &= 0,10 \times 23545 \\ &= 2354,5 \text{ kN} \end{aligned}$$

Beban gempa vertikal:

$$Q_{EQ} = \frac{T_{eq}}{L} = \frac{2354,5}{50} = 47,09 \text{ kN/m}$$

Resume Pembebanan Yang Terjadi Pada Box Girder

1. Berat sendiri *box girder*

$$P_{MS} = 426,5 \text{ kN/m} = 42,65 \text{ T/m}$$

2. Beban mati tambahan

$$P_{MA} = 44,4 \text{ kN/m} = 4,44 \text{ T/m}$$

3. Beban Lajur "D"

- Beban Terbagi Rata (BTR)

$$q_{BTR} = 81 \text{ kN/m}$$

- Beban Garis Terpusat (BGT)

$$q_{BGT} = 770,4 \text{ kN/m}$$

4. Beban angin (T_{EW})

$$T_{EW} = 1,4 \text{ kN/m}$$

5. Beban pejalan kaki (TTP)

$$(T_{TP}) = 1,6 \text{ kN/m}$$

6. Beban gempa (T_{EQ})

$$T_{EQ} = 47,09 \text{ kN/m}$$

Kombinasi beban untuk pembebanan jembatan ini berdasarkan pada RSNI T-02-2005 yaitu sebagai berikut:

1. $(P_{MS} + P_{MA}) + (BTR + BGT)$
2. $(P_{MS} + P_{MA}) + (BTR + BGT) + (TP)$
3. $(P_{MS} + P_{MA}) + (BTR + BGT) + (EW)$
4. $(P_{MS} + P_{MA}) + (EQ)$

Dimana:

P_{MS} = berat sendiri *box girder*

P_{MA} = beban mati tambahan

BTR = beban merata tersebar beban lajur

BGT = beban garis terpusat beban lajur

TP = beban pejalan kaki

EW = beban angin

EQ = beban gempa

Berikut adalah hasil serta gambar dari momen pembebanan dengan bantuan program SAP 2000 v.11:

1. Momen beban sendiri = 87467,996 kN/m
2. Momen beban mati tambahan = 9623,55 kN/m
3. Momen beban terbagi rata (BTR) = 8573,221 kN/m
4. Momen beban garis terpusat (BGT) = 42323,22 kN/m
5. Momen pejalan kaki = 2365,596 kN/m
6. Momen gaya angin = 2395,7 kN/m
7. Momen gaya gempa = 10730,78 kN/m

4.12. Gaya Prestress, Eksentrisitas Dan Jumlah Tendon

4.12.1. Gaya Prestress

Kondisi awal (saat transfer)

- Mutu beton ($f'c$) = 49,8 Mpa.

Kuat tekan beton pada saat transfer

$$f_{ci} = 80\% \times f'c$$

$$f_{ci} = 80\% \times 49,8$$

$$f_{ci} = 39,84 \text{ Mpa}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur menurut SNI T-12-2004

Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$\begin{aligned}f_{cc} &= 0,6 \times f_{ci} \\f_{cc} &= 0,6 \times 39,84 \\f_{cc} &= 23,9 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Tarik

$$\begin{aligned}f_{ct} &= 0,25 \times \sqrt{39,84} \\f_{ct} &= 0,25 \times \sqrt{39,84} \\f_{ct} &= 0,95 \text{ Mpa}\end{aligned}$$

Letak titik berat terhadap sisi bawah profil *box girder*, $Y_b = 1,51$ m. Direncanakan jarak titik berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* adalah, $Z_o = 0,20$ m.

Eksentrisitas Tendon, $e_s = Y_b - Z_o = 1,51 - 0,20 = 1,31$ m

Tahanan momen sisi atas: $W_a = 17,4 \text{ m}^3$

Tahanan momen sisi bawah: $W_b = 10,8 \text{ m}^3$

M_T = momen maksimum pada seluruh bentang akibat beban sendiri
 $= 87467,996 \text{ kN/m} = 87467,996 \times 10^6 \text{ Nm}$

- Tegangan pada Serat atas

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e x Y_t}{I} - \frac{M_t x Y_t}{I}$$

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e}{W_a} - \frac{M_t}{W_a}$$

$$0,95 = -\frac{F_o}{17,06 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1310}{17,4 \times 10^9} - \frac{87467,996 \times 10^6}{17,4 \times 10^9}$$

$$F_o = 358558430 \text{ N}$$

- Tegangan pada serat bawah

$$f_{cc} = \frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e}{W_b} - \frac{M_t}{W_b}$$

$$23,9 = \frac{F_o}{17,06 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1310}{10,8 \times 10^9} - \frac{87467,996 \times 10^6}{10,8 \times 10^9}$$

$$F_o = 177860500 \text{ N}$$

Gaya *jacking* yang menentukan adalah gaya F_o pada serat bawah (tekan) yaitu $F_o = 177860500 \text{ N} = 177860,5 \text{ kN}$.

Baja pratekan direncanakan menggunakan kabel jenis *strand seven wiresstrees relieved*. Dengan mengacu pada Tabel ASTM A-416 berikut adalah jenis dan karakteristik dari baja pratekan yang digunakan:

- Jenis *strand*: *Uncoated 7 wire superstrand* ASTM A-416 grade 270.
- Diameter = 15,2 mm.
- Luas nominal penampang *strand* (A_s) = 140 mm².
- Nominal massa = 1,102 kg/m.
- Beban putus minimal satu *strand* (P_{bs}): 260,7 kN (100% UTS atau 100% beban putus).

Jumlah *strand* yang diperlukan n_s

$$n_s = \frac{F_o}{P_{bs}} = \frac{177860,5}{260,7} = 683 \text{ strand}$$

Jumlah kawat untaian (*strand cable*) untuk tiap tendon adalah 30 dan 35 kawat untaian tiap tendon.

Digunakan jumlah *strand* sebagai berikut:

n_{t1} = 8 tendon masing-masing 30 *strand*/tendon. Jumlah tendon n_{s1} = 240 *strands*

n_{t2} = 6 tendon masing-masing 35 *strand*/tendon. Jumlah tendon n_{s2} = 210 *strands*

n_{t3} = 8 tendon masing-masing 30 *strand*/tendon. Jumlah tendon n_{s3} = 240 *strands*

Jumlah tendon $n_t = n_{t1} + n_{t2} + n_{t3} = 8 + 6 + 8 = 24$ tendon

Jumlah strands $n_s = n_{s1} + n_{s2} + n_{s3} = 240 + 210 + 240 = 690$ strands

Beban satu strands:

$$P_{bs1} = \frac{F_o}{n_s} = \frac{177860,5}{690} = 257,78 \text{ kN}$$

Persentase tegangan yang timbul pada baja (% *jacking force*)

$$p_o = \frac{F_o}{n_t \times P_{bs}} = \frac{177860,5}{24 \times 260,7} = 28,43\% < 85\% \dots\dots\dots\text{Ok! (sesuai pasal$$

4.4.3.2.2. RSNI-T-12-2004)

Gaya *prestrees* yang terjadi akibat *jacking*:

$$P_j = p_o \times n_s \times P_{bs1} = 0,2843 \times 690 \times 257,78 = 50567,93 \text{ kN}$$

Kondisi akhir (saat service)

Diperkirakan kehilangan tegangan (*loss of prestress*) = 25%

Gaya *prestress* akhir setelah kehilangan tegangan (*loss of prestress*) sebesar 25%:

$$P_{\text{eff}} = (100\% - 25\%) \times P_j = 75\% \times 50567,93 = 37925,96 \text{ kN}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur pada saat *service* menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$f_{cc} = 0,45 \times f'_c$$

$$f_{cc} = 0,45 \times 49,8$$

$$f_{cc} = 22,41 \text{ MPa}$$

Tarik

$$f_{ct} = 0,5 \times \sqrt{f'_c}$$

$$f_{ct} = 0,5 \times \sqrt{49,8}$$

$$f_{ct} = 3,53 \text{ Mpa}$$

Momen-momen yang terjadi akibat pembebanan (berdasarkan perhitungan momen dengan program SAP 2000 v. 11, detailnya terdapat pada lampiran).

1. Momen akibat berat sendiri

$$M_{MS} = 87467,996 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

2. Momen akibat beban mati tambahan

$$M_{MA} = 9623,55 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

3. Momen akibat beban lajur "D"

$$M_{TD} = 50896,441 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

- Tegangan di serat atas

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e}{W_a} - \frac{M (M_S + M_A)}{W_a} - \frac{M_{TD}}{W_a}$$

$$3,53 = -\frac{F_o}{17,06 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1310}{17,4 \times 10^9} - \frac{(87467,996 \times 10^6) + (9623,55 \times 10^6)}{17,4 \times 10^9} - \frac{50896,441 \times 10^6}{17,4 \times 10^9}$$

$$F_o = 89878800 \text{ N}$$

- Tegangan di serat bawah

$$f_{cc} = \frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e}{Wb} - \frac{M (MS+MA)}{Wb} - \frac{MTD}{Wb}$$

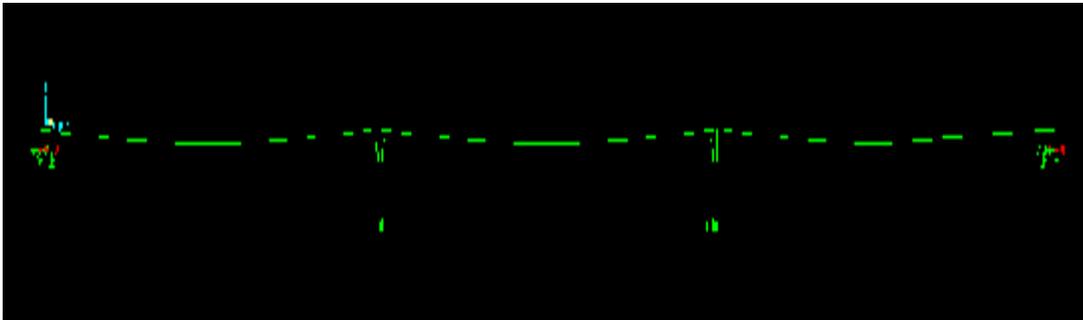
$$22,41 = \frac{F_o}{17,06 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1310}{10,8 \times 10^9} - \frac{(87467,996 \times 10^6) + (9623,55 \times 10^6)}{10,8 \times 10^9} - \frac{50896,441 \times 10^6}{10,8 \times 10^9}$$

$$F_o = 200757970 \text{ N}$$

Gaya yang menentukan adalah gaya F_o yang terjadi pada serat bawah yaitu:

$$F_o = 200757970 \text{ Newton} = 200757,97 \text{ kN.}$$

4.12.2. Posisi tendon



Gambar 4.11: Posisi tendon di dalam *box girder*.

$$e_s = 1310 \text{ mm}^2 = 1,31 \text{ m}$$

$$e_s' = y_a - 0,25 \text{ m} = 0,99 - 0,25 = 0,74 \text{ m}$$

Kurva parabolic dari jalur tendon tersebut dapat ditentukan dengan persamaan parabolic, yaitu:

$$f(x) = ax^2 + bx + c$$

- Bagian 1 (0 – 37,5 m)

$$e_s = 1,44 \text{ m}$$

$$F(0,0)$$

$$a(0)^2 + b(0) + c = 0$$

$$c = 0$$

$$f(18,75 ; -1,44)$$

$$\begin{aligned}
 a (18,75)^2 + b (18,75) + c &= -1,44 \\
 351,5625 a + 18,75 b &= -1,44
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
 f(37,5 ; 0) \\
 a (37,5)^2 + b (37,5) + c &= 0 \\
 1406,25 a + 37,5 b &= 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Dengan eliminasi persamaan 1 dan 2 maka akan dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$F(x) = 0,00409x^2 - 0,1536x$$

- Bagian 2 (37,5 m – 62,5 m)

$$e_s' = 0,61 \text{ m}$$

$$F(0 ; 0,61)$$

$$a (0)^2 + b (0) + c = 0,61$$

$$c = 0,61$$

$$f(-12,5 ; 0)$$

$$a (-12,5)^2 + b (-12,5) + c = 0$$

$$156,25 a - 12,5 b + 0,61 = 0 \tag{1}$$

$$f(12,5 ; 0)$$

$$a (12,5)^2 + b (12,5) + c = 0$$

$$156,25 a + 12,5 b + 0,61 = 0 \tag{2}$$

Dengan eliminasi persamaan 1 dan 2 maka akan dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$F(x) = -0,0078x^2 + 0,0488x + 0,61$$

- Bagian 3 (62,5 m – 93,75 m)

$$e_s = 1,44 \text{ m}$$

$$F(0,0)$$

$$a (0)^2 + b (0) + c = 0$$

$$c = 0$$

$$f(18,75 ; -1,44)$$

$$a (18,75)^2 + b (18,75) + c = 0$$

$$351,5625 a + 18,75 b = -1,44 \tag{1}$$

$$f(37,5; 0)$$

$$a(37,5)^2 + b(37,5) + c = 0$$

$$1406,25a + 37,5b = 0 \quad (2)$$

Dengan eliminasi persamaan 1 dan 2 maka akan dihasilkan persamaan sebagai berikut:

$$F(x) = 0,00409x^2 - 0,0823x$$

- Bagian 4 (93,75 m – 112,5 m)

$$e_s = 0,61$$

Persamaan pada bagian 4 ini sama dengan persamaan pada bagian 2, yaitu:

$$F(x) = -0,0078x^2 + 0,0488x + 0,61$$

- Bagian 5 (112,5 m – 150 m)

$$e_s = 1,44$$

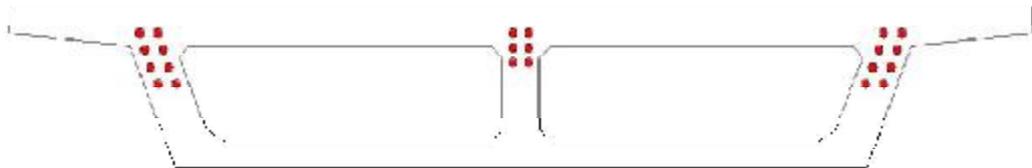
Persamaan pada bagian 5 ini sama dengan persamaan pada bagian 1, yaitu:

$$F(x) = 0,00409x^2 - 0,1536x$$

- Posisi tendon pada bagian awal (0 m)

$$\text{Tetapkan } Y_d'' = 0,2 \text{ m}$$

$$a'' = Y_b - 1,25 Y_d'' = 1,51 - (1,25 \times 0,2) = 1,26 \text{ m}$$



Jarak masing-masing tendon terhadap alas:

$$Z_1'' = a'' + 5 Y_d'' = 1,26 + 5(0,2) = 2,26 \text{ m}$$

$$Z_2'' = a'' + 4 Y_d'' = 1,26 + 4(0,2) = 2,06 \text{ m}$$

$$Z_3'' = a'' + 3 Y_d'' = 1,26 + 3(0,2) = 1,86 \text{ m}$$

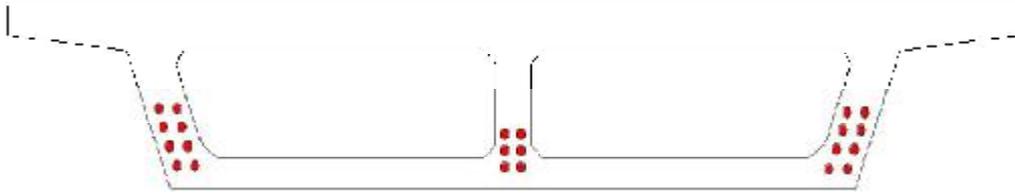
$$Z_4'' = a'' + 2 Y_d'' = 1,26 + 2(0,2) = 1,66 \text{ m}$$

$$Z_a'' = a'' = 1,26 \text{ m}$$

- Posisi tendon pada bagian tengah (75 m)

$$\text{Tetapkan } Y_d'' = 0,2 \text{ m}$$

$$a'' = Y_a - 1,25 Y_d'' = 0,99 - 1,25 (0,2) = 0,74 \text{ m}$$



$$Z_1'' = a'' + 5 Y_d'' = 0,74 + 5 (0,2) = 1,74 \text{ m}$$

$$Z_2'' = a'' + 6 Y_d'' = 0,74 + 6 (0,2) = 1,94 \text{ m}$$

$$Z_3'' = a'' + 7 Y_d'' = 0,74 + 7 (0,2) = 2,14 \text{ m}$$

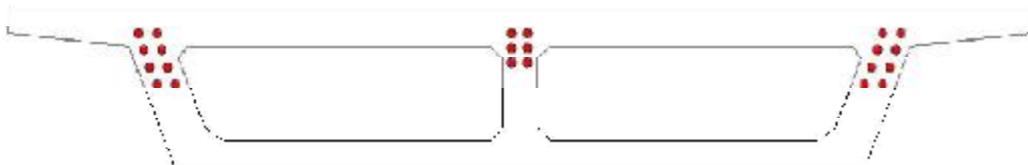
$$Z_4'' = a'' + 8 Y_d'' = 0,74 + 8 (0,2) = 2,34 \text{ m}$$

$$Z_a'' = a'' = 0,74 \text{ m}$$

- Posisi tendon pada bagian akhir (150 m)

Tetapkan $Y_d'' = 0,2 \text{ m}$

$$a'' = Y_b - 1,25 Y_d'' = 1,25 - (1,25 \times 0,2) = 1,00 \text{ m}$$



Jarak masing-masing tendon terhadap alas:

$$Z_1'' = a'' + 5 Y_d'' = 1,26 + 5 (0,2) = 2,26 \text{ m}$$

$$Z_2'' = a'' + 4 Y_d'' = 1,26 + 4 (0,2) = 2,06 \text{ m}$$

$$Z_3'' = a'' + 3 Y_d'' = 1,26 + 3 (0,2) = 1,86 \text{ m}$$

$$Z_4'' = a'' + 2 Y_d'' = 1,26 + 2 (0,2) = 1,66 \text{ m}$$

$$Z_a'' = a'' = 1,26 \text{ m}$$

Setelah dilakukan pemodelan tendon pada program SAP 2000 v.11, maka diperoleh nilai masing-masing posisi tendon dalam *box girder* adalah sebagai berikut:

Tabel 4.13: Posisi tendon didalam *box girder*.

Point	X m	Y m	Z m	Tendon Distance m
1	-7.96E-16	-6.5	-0.24	0
2	1.3889	-6.4136	-0.402	1.3889
3	2.7778	-6.3321	-0.5548	2.7778
4	4.1667	-6.2556	-0.6983	4.1667
5	5.5556	-6.184	-0.8326	5.5556
6	6.9444	-6.1173	-0.9576	6.9444
7	8.3333	-6.0556	-1.0733	8.3333
8	9.7222	-5.9988	-1.1798	9.7222
9	11.1111	-5.9469	-1.277	11.1111
10	12.5	-5.9	-1.365	12.5
11	13.8889	-5.858	-1.4437	13.8889
12	15.2778	-5.821	-1.5131	15.2778
13	16.6667	-5.7889	-1.5733	16.6667
14	18.0556	-5.7617	-1.6243	18.0556
15	19.4444	-5.7395	-1.6659	19.4444
16	20.8333	-5.7222	-1.6983	20.8333
17	22.2222	-5.7099	-1.7215	22.2222
18	23.6111	-5.7025	-1.7354	23.6111
19	25	-5.7	-1.74	25
20	26.3889	-5.7025	-1.7354	26.3889
21	27.7778	-5.7099	-1.7215	27.7778
22	29.1667	-5.7222	-1.6983	29.1667
23	30.5556	-5.7395	-1.6659	30.5556
24	31.9444	-5.7617	-1.6243	31.9444
25	33.3333	-5.7889	-1.5733	33.3333
26	34.7222	-5.821	-1.5131	34.7222
27	36.1111	-5.858	-1.4437	36.1111
28	37.5	-5.9	-1.365	37.5
29	38.8889	-5.9469	-1.277	38.8889
30	40.2778	-5.9988	-1.1798	40.2778
31	41.6667	-6.0556	-1.0733	41.6667
32	43.0556	-6.1173	-0.9576	43.0556
33	44.4444	-6.184	-0.8326	44.4444
34	45.8333	-6.2556	-0.6983	45.8333
35	47.2222	-6.3321	-0.5548	47.2222

Tabel 4.13: *Lanjutan.*

Point	X m	Y m	Z m	Tendon Distance m
37	50	-6.5	-0.24	50
38	51.3889	-6.4136	-0.402	51.3889
39	52.7778	-6.3321	-0.5548	52.7778
40	54.1667	-6.2556	-0.6983	54.1667
41	55.5556	-6.184	-0.8326	55.5556
42	56.9444	-6.1173	-0.9576	56.9444
43	58.3333	-6.0556	-1.0733	58.3333
44	59.7222	-5.9988	-1.1798	59.7222
45	61.1111	-5.9469	-1.277	61.1111
46	62.5	-5.9	-1.365	62.5
47	63.8889	-5.858	-1.4437	63.8889
48	65.2778	-5.821	-1.5131	65.2778
49	66.6667	-5.7889	-1.5733	66.6667
50	68.0556	-5.7617	-1.6243	68.0556
51	69.4444	-5.7395	-1.6659	69.4444
52	70.8333	-5.7222	-1.6983	70.8333
53	72.2222	-5.7099	-1.7215	72.2222
54	73.6111	-5.7025	-1.7354	73.6111
55	75	-5.7	-1.74	75
56	76.3889	-5.7025	-1.7354	76.3889
57	77.7778	-5.7099	-1.7215	77.7778
58	79.1667	-5.7222	-1.6983	79.1667
59	80.5556	-5.7395	-1.6659	80.5556
60	81.9444	-5.7617	-1.6243	81.9444
61	83.3333	-5.7889	-1.5733	83.3333
62	84.7222	-5.821	-1.5131	84.7222
63	86.1111	-5.858	-1.4437	86.1111
64	87.5	-5.9	-1.365	87.5
65	88.8889	-5.9469	-1.277	88.8889
66	90.2778	-5.9988	-1.1798	90.2778
67	91.6667	-6.0556	-1.0733	91.6667
68	93.0556	-6.1173	-0.9576	93.0556
69	94.4444	-6.184	-0.8326	94.4444
70	95.8333	-6.2556	-0.6983	95.8333
71	97.2222	-6.3321	-0.5548	97.2222
72	98.6111	-6.4136	-0.402	98.6111
73	100	-6.5	-0.24	100
74	101.3889	-6.4136	-0.402	101.3889

Tabel 4.13: *Lanjutan.*

Point	X m	Y m	Z m	Tendon Distance m
76	104.1667	-6.2556	-0.6983	104.1667
77	105.5556	-6.184	-0.8326	105.5556
78	106.9444	-6.1173	-0.9576	106.9444
79	108.3333	-6.0556	-1.0733	108.3333
80	109.7222	-5.9988	-1.1798	109.7222
81	111.1111	-5.9469	-1.277	111.1111
82	112.5	-5.9	-1.365	112.5
83	113.8889	-5.858	-1.4437	113.8889
84	115.2778	-5.821	-1.5131	115.2778
85	116.6667	-5.7889	-1.5733	116.6667
86	118.0556	-5.7617	-1.6243	118.0556
87	119.4444	-5.7395	-1.6659	119.4444
88	120.8333	-5.7222	-1.6983	120.8333
89	122.2222	-5.7099	-1.7215	122.2222
90	123.6111	-5.7025	-1.7354	123.6111
91	125	-5.7	-1.74	125
92	126.4706	-5.7471	-1.6518	126.4706
93	127.9412	-5.7941	-1.5635	127.9412
94	129.4118	-5.8412	-1.4753	129.4118
95	130.8824	-5.8882	-1.3871	130.8824
96	132.3529	-5.9353	-1.2988	132.3529
97	133.8235	-5.9824	-1.2106	133.8235
98	135.2941	-6.0294	-1.1224	135.2941
99	136.7647	-6.0765	-1.0341	136.7647
100	138.2353	-6.1235	-0.9459	138.2353
101	139.7059	-6.1706	-0.8576	139.7059
102	141.1765	-6.2176	-0.7694	141.1765
103	142.6471	-6.2647	-0.6812	142.6471
104	144.1176	-6.3118	-0.5929	144.1176
105	145.5882	-6.3588	-0.5047	145.5882
106	147.0588	-6.4059	-0.4165	147.0588
107	148.5294	-6.4529	-0.3282	148.5294
108	150	-6.5	-0.24	150

4.13. Analisa Kehilangan Gaya Prategang

Gaya prategang pada beton mengalami proses reduksi yang progresif (pengurangan secara berangsur-angsur) sejak gaya prategang awal diberikan, sehingga tahapan gaya prategang perlu ditentukan pada setiap tahanan pembebanan, yaitu dari tahapan transfer gaya prategang ke beton sampai ke berbagai tahapan prategang yang terjadi pada kondisi beban kerja hingga mencapai kondisi ultimit. Pada dasarnya nilai masing-masing kehilangan gaya prategang adalah kecil, tetapi apabila dijumlahkan dapat menyebabkan penurunan gaya *jacking* yang signifikan, yaitu 15% - 20%, sehingga kehilangan gaya prategang harus dipertimbangkan. Beberapa hal yang harus diperhatikan untuk meminimalkan kehilangan gaya prategang adalah:

1. Mutu beton yang digunakan, minimal 40 MPa untuk memperkecil rangkak.
2. Tendon yang digunakan adalah mutu tinggi yang memiliki relaksasi rendah.

Secara umum, reduksi gaya prategang dapat dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu:

1. Kehilangan elastis langsung (segera) yang terjadi pada saat proses pabrikasi atau konstruksi, termasuk perpendekan (deformasi) beton secara elastis, kehilangan karena pengakuran dan kehilangan karena gesekan.
2. Kehilangan yang bergantung pada waktu, seperti rangkak, susut dan kehilangan akibat efek temperatur dan relaksasi baja, yang semuanya dapat ditentukan pada kondisi limit tegangan akibat beban kerja di dalam beton prategang.

4.13.1. Perhitungan Kehilangan Gaya Prategang Langsung

4.13.1.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Perpendekan Beton Secara Elastis (ES).

Pada struktur yang menggunakan kabel tunggal, tidak ada kehilangan gaya prategang akibat perpendekan beton, karena gaya pada kabel diukur setelah perpendekan terjadi. Pada penampang yang menggunakan lebih dari satu kabel, kehilangan gaya prategang ditentukan oleh kabel yang pertama ditarik dan memakai harga setengahnya untuk mendapatkan rata-rata semua kabel. Kehilangan

gaya prategang pada struktur pasca tarik dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$ES = \Delta f_c = \frac{n P_i}{A_c}$$

Dimana:

f_c = tegangan pada penampang

P_i = gaya prategang awal

$$f_c = \frac{P_{bs}}{A_{st}} = \frac{260,7 \times 10^3}{140} = 1862,14 \text{ Mpa}$$

$$ES_1 = \frac{690 \times 260,7 \times 10^3}{17,06 \times 10^6} = 10,54 \text{ Mpa}$$

Kehilangan rata-rata gaya prategang:

$$ES = 0,5 \times ES_1 = 0,5 \times 10,54 = 5,27 \text{ Mpa}$$

Sehingga persentase kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis adalah:

$$\% ES = \frac{5,27}{1862,14} \times 100\% = 0,28\%$$

4.13.1.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan Pada Tendon (Ps)

Berdasarkan SNI 03-2847-2002, kehilangan gaya prategang akibat friksi pada tendon pasca tarik dapat dihitung dengan rumus:

$$P_s = P_o^{(K L_x + \mu \alpha)}$$

Dimana:

P_o = Gaya *prestress* yang terjadi akibat gaya *jacking* = 50567,93 kN

K = Koefisien Wooble
= 0,0020 (Tabel 14 pasal 20.6 SNI 03-2847-2002)

L_x = Panjang kabel yang ditinjau = 50 m

μ = Koefisien friksi = 0,20 (Tabel 14 pasal 20.6 SNI 03-2847-2002)

α = Perubahan sudut akibat pengaruh kelengkungan

$$= \frac{8 y}{x} \text{ rad} = \frac{8 \times 1,310}{50} = 0,21 \text{ rad}$$

Maka, $K L_x + \mu \alpha = 0,0020 \times 50 + 0,20 \times 0,21 = 0,142 < 0,3$

Sehingga didapat,

$$P_s = P_o^{(1 + K L \alpha + \mu \alpha)} = 50567,93^{(1 + 0,142)} = 235410,29 \text{ kN}$$

Maka, kehilangan tegangan yang terjadi adalah:

$$\begin{aligned} \% \text{ loss} &= \frac{P_s - P_o}{P_o} \times 100\% \\ &= \frac{235410,29 - 50567,93}{50567,93} \times 100\% \\ &= 3,66 \% \end{aligned}$$

$$\Delta f_{ps} = \% \text{ loss} \times \text{teg. } \textit{Ultimit strand} = 3,66\% \times 1862,14 = 68,15 \text{ Mpa}$$

4.13.1.3. Kehilangan gaya prategang akibat slip pada angkur (ANC)

Kehilangan gaya prategang ini terjadi pada saat transfer gaya pendongkrak ke angkur. Tarikan mesin pendongkrak akan mendorong baji masuk kedalam konus dan setelah *jacking* dilepas, kabel akan menarik baji lebih rapat kedalam konus. Panjang atau besar slip tergantung pada tipe baji dan tegangan pada kawat tendon. Harga rata-rata panjang slip akibat pengankuran adalah 2,5 mm, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$ANC = \Delta L = \frac{f_c}{E_s} \times L$$

Dimana:

$$f_c = \text{tegangan pada penampang} = 1862,14 \text{ Mpa}$$

$$E_s = \text{modulus elastisitas baja tendon} = 200.000 \text{ Mpa}$$

$$\Delta L = \frac{f_c}{E_s} \times L = \frac{1862,14}{200000} \times 50000 = 465,64 \text{ mm}$$

Dengan rata-rata tiap slip 2,5 mm, maka persentase kehilangan gaya prategang akibat slip angkur adalah:

$$ANC = \frac{2,5}{465,64} \times 100\% = 0,536 \%$$

Maka, besarnya kehilangan prategang yang terjadi adalah

$$\Delta f_{ANC} = 0,536\% \times 1862,14 = 9,98 \text{ Mpa}$$

4.13.2. Kehilangan Gaya Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu

4.13.2.1. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Rangkak Beton (CR)

Prategang yang terus menerus pada beton suatu batang prategang dapat mengakibatkan rangkakan pada beton yang secara efektif mengurangi tegangan pada baja bermutu tinggi. Kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkakan dapat ditentukan dengan dua cara, yaitu cara regangan rangkakan batas dan cara koefisien rangkakan. Dengan koefisien rangkakan, besarnya kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkakan dapat ditentukan dengan mengacu pada rumus seperti berikut:

$$CR = K_{CR} \frac{E_s}{E_c} (f_{ci} - f_{cd})$$

Dimana:

K_{cr} = Koefisien rangkakan = 2,0 untuk pratarik dan 1,6 untuk pasca tarik

E_c = Modulus elastisitas beton saat umur beton 28 hari

E_s = Modulus elastisitas baja prategang

f_{cs} = Tegangan pada beton pada level pusat baja segera setelah transfer

f_{cd} = Tegangan pada beton akibat beban mati tambahan setelah prategang diberikan

n = Rasio modulus (E_s/E_c)

E_c = 39074,5 Mpa

E_s = 200000 Mpa

$$f_{ci} = - \frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{MDe}{I_c}$$

$$A_c = 17,06 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$I_c = 13,18 \times 10^{12} \text{ mm}^4$$

E = 1310 mm

$$r^2 = \frac{I_c}{A_c} = \frac{13,18 \times 10^{12}}{17,06 \times 10^6} = 0,77 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

M_D = Momen akibat beban sendiri = 87467,996 kN = 87467,996 x 10⁶ Nmm

P_i = 0,75 x f_{pu} x A_{ps} = 0,75 x 1862,14 x 49280 = 68824694,4 N

$$\begin{aligned} f_{ci} &= - \frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{MDe}{I_c} \\ &= - \frac{68824694,4}{17,06 \times 10^6} \left(1 + \frac{1310^2}{(0,77 \times 10^6)^2} \right) + \frac{(87467,996 \times 10^6) \times 1310}{13,18 \times 10^{12}} \\ &= 6,98 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$M_{MA} = \text{Momen akibat beban mati tambahan} = 9623,55 \text{ kN} = 9623,55 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

$$f_{cd} = \frac{MMA \cdot e}{I_c} = \frac{9623,55 \times 10^6 \times 1310}{13,18 \times 10^{12}} = 0,96 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned} CR &= K_{CR} \frac{E_s}{E_c} (f_{ci} - f_{cd}) \\ &= 1,6 \frac{200000}{39074,5} (6,98 - 0,96) = 49,3 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{CR}{f_c} \times 100\% = \frac{49,3}{1862,14} \times 100\% = 2,67 \%$$

4.13.2.2. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Beban Susut Beton (SH)

Seperti halnya pada rangkai beton, besarnya susut pada beton dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, tipe perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan.

Untuk komponen struktur pasca tarik, kehilangan prategang akibat susut agak lebih kecil karena sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pasca tarik. Besarnya kehilangan prategang akibat susut pada beton dapat dihitung dengan rumus:

$$SH = \varepsilon_{CS} E_s$$

Dimana:

$$E_s = \text{modulus elastisitas baja prategang} = 200.000 \text{ Mpa}$$

$$\varepsilon_{CS} = \text{regangan susut sisa total dengan harga:}$$

$$\varepsilon_{CS} = 300 \times 10^{-6} \text{ untuk struktur pratarik}$$

$$\varepsilon_{CS} = \frac{200 \times 10^{-6}}{\log(t+2)} \text{ untuk struktur pasca tarik, dengan } t \text{ adalah usia beton pada}$$

waktu transfer prategang dalam hari

$$\varepsilon_{CS} = \frac{200 \times 10^{-6}}{\log(7+2)} = 0,0002096$$

$$\begin{aligned} SH &= \varepsilon_{CS} E_s \\ &= 0,0002096 \times 200000 \\ &= 41,92 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{41,92}{1862,14} \times 100\% = 2,25\%$$

4.13.2.3. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Baja (RE)

Akibat perpendekan elastis (kehilangan gaya prategang seketika setelah peralihan) dan gaya prategang yang tergantung waktu, CR dan SH ada pengurangan berkelanjutan pada tegangan beton, jadi kehilangan gaya prategang akibat relaksasi berkurang. Sebenarnya balok prategang mengalami perubahan regangan baja yang konstan di dalam tendon bila terjadi rangkai yang tergantung pada nilai waktu. Oleh karena itu, ACI memberikan perumusan untuk kehilangan gaya prategang dimana nilai dari K_{RE} , J dan C tergantung dari jenis dan tipe tendon, dimana untuk *strand* atau kawat *stress* yang dipakai adalah *relieved* derajat 1.745 Mpa. Adapun perumusan tersebut yaitu:

$$RE = C \{ K_{RE} - J (SH + CR + ES) \}$$

Dimana:

K_{RE} = koefisien relaksasi = 138 Mpa (Tabel 4-5 T.Y.Lin, hal 90)

J = faktor waktu = 0,1 (Tabel 4-5 T.Y.Lin, hal 90)

C = faktor relaksasi = 1 (Tabel 4-5 T.Y.Lin)

SH = kehilangan tegangan akibat susut

CR = kehilangan tegangan akibat rangkai

ES = kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis

$$\begin{aligned} RE &= C \{ K_{RE} - J (SH + CR + ES) \} \\ &= 1 \{ 138 - 0,1 (41,92 + 49,3 + 5,27) \} \\ &= 128,35 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{128,35}{1862,14} \times 100\% = 6,89 \%$$

Resume kehilangan tegangan yang terjadi adalah:

1. Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis (ES) = 0,28%
2. Kehilangan tegangan akibat gesekan tendon (Ps) = 3,66%
3. Kehilangan tegangan akibat slip ankur (ANC) = 0,536%
4. Kehilangan tegangan akibat rangkai beton (CR) = 2,67%
5. Kehilangan tegangan akibat susut beton (SH) = 2,25%
6. Kehilangan tegangan akibat relaksasi baja (RE) = 6,89%

Persentase kehilangan gaya prategang keseluruhan adalah:

$$\begin{aligned}\Delta f_{pT} &= ES + Ps + ANC + CR + SH + RE \\ &= 0,28\% + 3,66\% + 0,356\% + 2,67\% + 2,25\% + 6,89\% \\ &= 16,106\%\end{aligned}$$

Pada perencanaan awal, kehilangan tegangan pada beton prategang sebesar 25%. Sehingga hasil dari estimasi perencanaan kehilangan tegangan yang telah di analisa yaitu:

$$16,106\% < 25\% \text{ (maka perencanaan ini dinyatakan OK!)}$$

4.14. Tegangan Yang Terjadi Akibat Gaya *Prestress*

Berdasarkan peraturan SNI 03-2947-2002, tegangan beton sesaat setelah penyaluran gaya *prestress* (sebelum terjadi kehilangan tegangan sebagai fungsi waktu) tidak boleh melampaui nilai berikut:

1. Tegangan serat tekan terluar harus $\leq 0,60 f'_{ci}$
2. Tegangan serat tarik terluar harus $\leq 0,25 \sqrt{f'_{ci}}$
3. Tegangan serat tarik terluar pada ujung-ujung komponen struktur di atas perletakan sederhana harus $\leq 0,5 \sqrt{f'_{ci}}$

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

1. Tegangan serat tekan terluar akibat pengaruh prategang, beban mati, dan beban hidup tetap $\leq 0,45 f'_{ci}$
2. Tegangan serat tarik terluar yang pada awalnya mengalami tekan $\leq 0,5 \sqrt{f'_{ci}}$

Kedadaan Awal (Saat Transfer)

Mutu beton *prestress*: K-600

$$\text{Kuat tekan beton (} f'_{ci} \text{)} = 0,83 \times K \times 100 = 0,83 \times 600 \times 100 = 49800 \text{ kPa}$$

Kuat tekan beton pada keadaan awal (saat *transfer*),

$$f'_{ci} = 0,80 \times f'_{ci} = 0,80 \times 49800 = 39840 \text{ kPa}$$

Tegangan ijin beton tekan:

$$0,60 \times f'_{ci} = 0,60 \times 39840 = 23904 \text{ kPa}$$

Tegangan ijin beton tarik:

$$0,25 \times \sqrt{f'_{ci}} = 0,25 \times \sqrt{39840} = 49,90 \text{ kPa}$$

Gaya prategang awal $P_t = 177860,5 \text{ kN}$

Momen maksimum akibat beban sendiri:

$$M_{bs} = 87467,996 \text{ kNm}$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

$$\text{Luas penampang (A)} = 17,06 \text{ m}^2$$

$$e_s = 1,31 \text{ m}$$

Maka,

Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_t}{A} + \frac{P_t \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a}$$

$$f_a = - \frac{177860,5}{17,06} + \frac{177860,5 \times 1,31}{17,4} - \frac{87467,996}{17,4}$$

$$f_a = - 2061,84 \text{ kPa}$$

Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_t}{A} - \frac{P_t \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b}$$

$$f_b = \frac{177860,5}{17,06} - \frac{177860,5 \times 1,31}{10,8} + \frac{87467,996}{10,8}$$

$$f_b = -19247,123 \text{ kPa}$$

$$f_b \leq 0,60 f'_{ci} = 19247,123 \leq 23904 \text{ (OK!)}$$

Kedadaan Setelah Loss of Prestress

Mutu beton *prestress*: K-600

Kuat tekan beton (f'_c) = 49800 kPa

Tegangan ijin beton tekan:

$$0,45 \times f'_c = 0,45 \times 49800 = 22410 \text{ kPa}$$

Tegangan ijin beton tarik:

$$0,5 \times \sqrt{f'_c} = 0,5 \times \sqrt{49800} = 11157,95 \text{ kPa}$$

$$P_{\text{eff}} = (100 - \% \text{loss total}) \times P_j = (100 - 16,606\%) \times 50567,93 = 42170,62 \text{ kN}$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

Momen maksimum akibat beban sendiri: $M_{bs} = 87467,996 \text{ kNm}$

Maka,

Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times e_s}{W_a} - \frac{M_{bs}}{W_a}$$

$$f_a = - \frac{42170,62}{17,06} + \frac{42170,62 \times 1,31}{17,4} - \frac{87467,996}{17,4}$$

$$f_a = - 4323,88 \text{ kPa}$$

Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times e_s}{W_b} + \frac{M_{bs}}{W_b}$$

$$f_b = \frac{42170,62}{17,06} - \frac{42170,62 \times 1,31}{10,8} + \frac{87467,996}{10,8}$$

$$f_b = -10742,13 \text{ kPa}$$

Kontrol: $f_a \leq 0,45 f'_c = 4323,88 \leq 22410 \text{ (OK!)}$

4.15. Tegangan Pada Box Girder Akibat Beban

a. Akibat beban sendiri

$$M_{MS} = 87467,996 \text{ kNm}$$

$$A = 17,06 \text{ m}^2$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

• Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{M_{MS}}{W_a} = - \frac{87467,996}{17,4} = -5026,89 \text{ kN/m}^2$$

• Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{M_{MS}}{W_b} = \frac{87467,996}{10,8} = 8098,89 \text{ kN/m}^2$$

b. Akibat beban mati tambahan

$$M_{MA} = 9623,55 \text{ kNm}$$

$$A = 17,06 \text{ m}^2$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{M_{MA}}{W_a} = - \frac{9623,55}{17,4} = - 553,08 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{MA}}{W_b} = \frac{9623,55}{10,8} = 891,07 \text{ kN/m}^2$$

c. Akibat beban pejalan kaki (TP)

$$M_{TP} = 2365,596 \text{ kNm}$$

$$A = 17,06 \text{ m}^2$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{M_{TP}}{W_a} = - \frac{2365,596}{17,4} = - 135,95 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{TP}}{W_b} = \frac{2365,596}{10,8} = 219,04 \text{ kN/m}^2$$

d. Akibat gaya angin

$$M_{TEW} = 2395,7 \text{ kNm}$$

$$A = 17,06 \text{ m}^2$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{M_{TEW}}{W_a} = - \frac{2395,7}{17,4} = - 137,68 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{TEW}}{W_b} = \frac{2395,7}{10,8} = 221,82 \text{ kN/m}^2$$

e. Akibat beban gempa (EQ)

$$M_{TEQ} = 10730,78 \text{ kNm}$$

$$A = 17,06 \text{ m}^2$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

• Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{M_{TEQ}}{W_a} = - \frac{10730,78}{17,4} = - 616,71 \text{ kN/m}^2$$

• Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{TEQ}}{W_b} = \frac{10730,78}{10,8} = 993,59 \text{ kN/m}^2$$

f. Akibat beban terbagi rata (BTR)

$$M_{BTR} = 8573,221 \text{ kNm}$$

$$A = 17,06 \text{ m}^2$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

• Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{M_{BTR}}{W_a} = - \frac{8573,55}{17,4} = - 492,73 \text{ kN/m}^2$$

• Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{BTR}}{W_b} = \frac{8573,55}{10,8} = 793,85 \text{ kN/m}^2$$

g. Akibat beban garis terpusat (BGT)

$$M_{BGT} = 42323,22 \text{ kNm}$$

$$A = 17,06 \text{ m}^2$$

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

• Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{M_{BGT}}{W_a} = - \frac{42323,22}{17,4} = - 2432,37 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan di serat bawah:

$$F_b = \frac{M_{BGT}}{Wb} = \frac{42323,22}{10,8} = 3918,82 \text{ kN/m}^2$$

h. Akibat susut beton

Besar gaya internal akibat susut beton dapat dinyatakan dengan:

$$P_s = A_{\text{plat}} \times E_c \times \Delta \varepsilon_{\text{su}} \times \left(\frac{1 - e^{-ef}}{cf} \right)$$

$$A_{\text{plat}} = (B_1 + B_2) \times t_1 = (11,5 + 5,5) \times 0,6 = 10,2 \text{ m}^2$$

$$E_c = \text{modulus elastisitas beton saat umur beton 28 hari} \\ = 4700 \sqrt{f'_c} = 4700 \sqrt{49,8} = 33167484 \text{ kPa}$$

$$e = \text{bilangan natural} = 2,7183$$

$$\Delta \varepsilon_{\text{su}} = \text{regangan dasar susut}$$

Berdasarkan panduan RSNI T-12-2004 (Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan) pasal 4.4.1.8 Tabel 4.4-1, regangan susut untuk beton 49,8 Mpa adalah 0,000153, cf = koefisien rangkai maksimum menurut RSNI T-12-2004 (Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan) pasal 4.4.1.9 Tabel 4.4-2, koefisien rangkai maksimum untuk beton 49,8 Mpa adalah 2,0.

Maka, gaya *internal* akibat susut beton adalah:

$$P_s = A_{\text{plat}} \times E_c \times \Delta \varepsilon_{\text{su}} \times \left(\frac{1 - e^{-cf}}{cf} \right)$$

$$P_s = 10,2 \times 33167484 \times 0,000153 \times [(1 - 2,7183^{-2})] = 44773,42 \text{ kN}$$

Tegangan akibat susut yang terjadi:

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_s}{A_{\text{plat}}} + \frac{P_s}{A} - \frac{P_s \times e'}{W_a}$$

$$f_a = - \frac{44773,42}{10,2} + \frac{44773,42}{17,06} - \frac{44773,42 \times 1,31}{17,4} = -5135,96 \text{ kPa}$$

- Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_s}{A} - \frac{P_s \times e'}{W_a}$$

$$f_b = \frac{44773,42}{17,06} - \frac{44773,42 \times 1,31}{17,4} = -746,40 \text{ kPa}$$

i. Tegangan akibat rangkai beton

Besarnya tegangan akibat rangkai beton (menurut peraturan NAASRA *bridge design specification*) dapat dihitung dengan persamaan:

$$\Sigma_{cr} = (1 - e^{-cf}) (\sigma_2 - \sigma_1)$$

σ_1 = tegangan *service* akibat berat sendiri

σ_2 = tegangan *service* akibat beban sendiri dan beban mati tambahan

cf = koefisien rangkai maksimum = 2,0

e = bilangan natural = 2,7183

Tegangan *service* akibat beban sendiri (σ_1):

- Tegangan beton di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times es}{Wa} - \frac{M_{MS}}{Wa}$$

$$f_a = - \frac{42170,62}{17,06} + \frac{42170,62 \times 1,31}{17,4} - \frac{87467,996}{17,4} = - 4323,88 \text{ kPa}$$

- Tegangan beton di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times es}{Wb} + \frac{M_{MS}}{Wb}$$

$$f_b = \frac{42170,62}{17,06} - \frac{42170,62 \times 1,31}{10,8} + \frac{87467,996}{10,8} = 5455,65 \text{ kPa}$$

Tegangan *service* akibat beban sendiri dan beban mati tambahan (σ_2):

- Tegangan beton di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times es}{Wa} - \frac{M_{MS} + M_{MA}}{Wa}$$

$$f_a = - \frac{42170,62}{17,06} + \frac{42170,62 \times 1,31}{17,4} - \frac{87467,996 + 9623,55}{17,4} = - 4876,96 \text{ kPa}$$

- Tegangan beton di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times es}{Wb} + \frac{M_{MS} + M_{MA}}{Wb}$$

$$f_b = \frac{42170,62}{17,06} - \frac{42170,62 \times 1,31}{10,8} + \frac{87467,996 + 9623,55}{10,8} = 6346,72 \text{ kPa}$$

Maka, tegangan akibar rangkai beton adalah:

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = [(1 - e^{-cf}) (\sigma_2 - \sigma_1)] = [(1 - 2,7183^{-2})(4876,96 - 4323,88)] = 475,65 \text{ kPa}$$

- Tegangan di serat bawah:

$$f_b = [(1 - e^{-cf}) (\sigma_2 - \sigma_1)] = [(1 - 2,7183^{-2})(6346,72 - 5455,65)] = 766,32 \text{ kPa}$$

j. Akibat prategang

Gaya prategang efektif (P_{eff}) = **42170,62** kN dengan eksentrisitas tendon (es) = 1,31 m

Luas penampang *box girder prestress* (A) = 17,06 m²

$$W_a = 17,4 \text{ m}^3$$

$$W_b = 10,8 \text{ m}^3$$

- Tegangan di serat atas:

$$f_a = - \frac{P_{eff}}{A} + \frac{P_{eff} \times es}{W_a}$$

$$f_a = - \frac{42170,62}{17,06} + \frac{42170,62 \times 1,31}{17,4} = 703,014 \text{ kPa}$$

- Tegangan di serat bawah:

$$f_b = \frac{P_{eff}}{A} - \frac{P_{eff} \times es}{W_b}$$

$$f_b = \frac{42170,62}{17,06} - \frac{42170,62 \times 1,31}{10,8} = -7587,04 \text{ kPa}$$

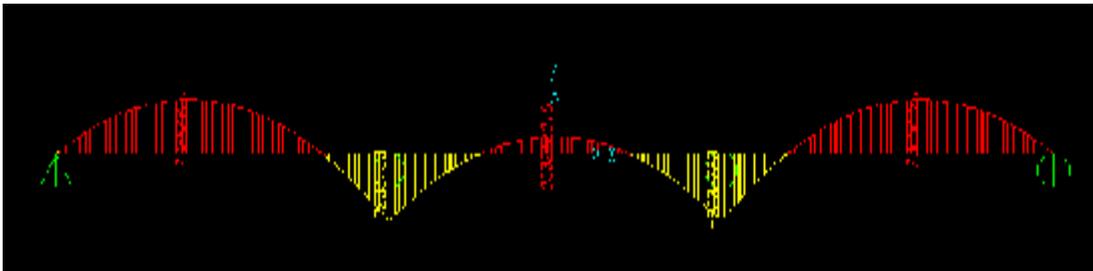
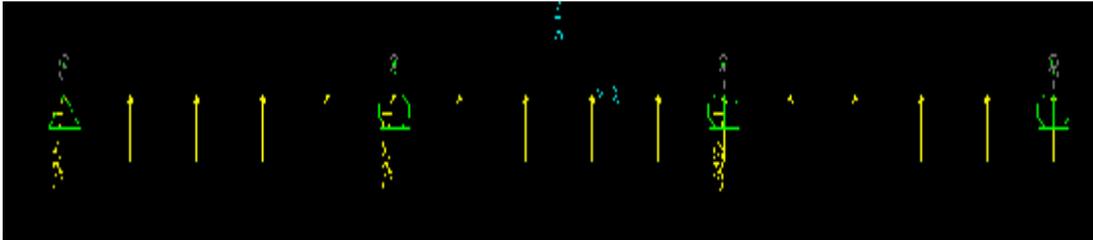
4.16. Metode Beban Ekivalen

Beban penyeimbang (qb)

- Untuk bentang 50 m

$$q_b = \frac{8 \times P_{eff} \times e_s}{L^2} = \frac{8 \times 42170,62 \times 1,31}{50^2} = 176,78 \text{ kN/m}$$

$$FEM = \frac{q_b \times L^2}{12} = \frac{176,78 \times 50^2}{12} = 36829,01 \text{ kNm}$$



Gambar 4.12: Momen yang terjadi pada jembatan setelah diberi beban ekivalen.

4.17. Kontrol Tegangan Kombinasi Pembebanan Terhadap Beban Layan

Mutu beton K-600, kuat tekan beton $f'c = 49800$ kPa

Tegangan ijin tekan beton, $f_{si} = 0,45 f'c = 22410$ kPa

Tegangan ijin tarik beton, $f_{bi} = 0,5 \sqrt{f'c} = 11157,95$ kPa

Kombinasi pembebanan untuk tegangan ijin:

Tabel 4.14: Kombinasi tegangan

Aksi / beban	Simbol	Kombinasi Pembebanan			
		1	2	3	4
3. Aksi tetap					
Berat sendiri	BS	0	0	0	0
Beban mati tambahan	MA	0	0	0	0
Susut beton	SH	0	0	0	0
Rangkak beton	CR	0	0	0	0
Prategang	PR	0	0	0	0
4. Aksi transien					
Beban terbagi rata	BTR	0	0	0	
Beban garis terpusat	BGT	0	0	0	
Beban pejalan kaki	TP		0		
5. Aksi lingkungan					
Beban angin	EW			0	
Beban gempa	EQ				0

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi I

Tabel 4.15: Tegangan kombinasi I

Teg	Berat sendiri	Beb. mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	BTR	BGT	Total kombinasi
f_a	-5026.89	-553.08	-5.136	475.65	703.014	-492.73	-2432.37	-12462.37
f_b	8098.89	891.07	-746	766.32	-7587.04	793.85	3918.82	6135.51

Keterangan: $f_a < 0,45 f'c$ (OK!) ; $f_b < 0,5 \sqrt{f'c}$ (OK!)

Cek: $-12462,37 < 22410$; $6135,51 < 11157,95$ (OK!)

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi II

Tabel 4.16: Tegangan kombinasi II

Teg	Berat sendiri	Beb. mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	BTR	BGT	Pejalan kaki	Total kombinasi
f_a	-5026.89	-553.08	-5.136	475.65	703.014	-492.73	-2432.37	-135.95	-12598
f_b	8098.89	891.07	-746	766.32	-7587.04	793.85	3918.82	210.04	6345.55

Keterangan: $f_a < 0,45 f'c$ (OK!) ; $f_b < 0,5 \sqrt{f'c}$ (OK!)

Cek: $-12598 < 22410$; $6345,55 < 11157,95$ (OK!)

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi III

Tabel 4.17: Tegangan kombinasi III

Teg	Berat sendiri	Beb. mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	BTR	BGT	Beban angin	Total kombinasi
f_a	-5026.89	-553.08	-5,136	475.65	703.014	-492.73	-2432.37	-137.68	-12600
f_b	8098.89	891.07	-746	766.32	-7587.04	793.85	3918.82	221.82	6357.33

Keterangan: $f_a < 0,45 f'c$ (OK!) ; $f_b < 0,5 \sqrt{f'c}$ (OK!)

Cek: $-12600 < 22410$; $6357,33 < 11157,95$ (OK!)

- Kontrol tegangan terhadap kombinasi IV

Tabel 4.18: Tegangan kombinasi IV

Teg.	Berat sendiri	Beb. Mati tambahan	Susut beton	Rangkak beton	Prategang	Beban gempa	Total kombinasi
f_a	-5026.89	-553.08	-5,136	475.65	703.014	-616.71	-10153.98
f_b	8098.89	891.07	-746	766.32	-7587.04	993.59	2416.43

Keterangan: $f_a < 0,45 f'c$ (OK!) ; $f_b < 0,5 \sqrt{f'c}$ (OK!)

Cek: $-10153,98 < 22410$; $2416,43 < 11157,95$ (OK!)

4.18. Perhitungan penulangan *box girder*

Data-data penampang *box girder* adalah:

Slab atas bagian tengah	$B_1 = 13$ meter
	$t_1 = 0,6$ meter
	$B_4 = 1,5$ meter
Slab bagian tepi	$t_3 = 0,6$ meter
	$B_2 = 2$ meter
Tinggi <i>box girder</i>	$t_2 = 0,4$ meter
	$H = 2,5$ meter
Dinding tepi	$t_4 = 0,6$ meter
Slab bawah	$B_3 = 11$ meter
	$t_5 = 0,4$ meter
Penebalan pada pertemuan slab dan dinding	$X = 0,2$ meter
	$Y = 0,2$ meter

4.18.1. Pelat Dinding

Tebal pelat dinding (t_4) = 600 mm

Digunakan tulangan (D) = 22 mm

$b_w = 1000$ mm

Beton *dacking* = 40 mm

$$d_x = 600 - 40 - \frac{22}{2} = 549 \text{ mm}$$

$f'_c = 49,8$ Mpa

$f_y = 400$ Mpa

$\emptyset = 0,8$

Direncanakan $\rho = 0,0025$

$$\begin{aligned} A_s &= \rho \times b \times d \\ &= 0,0025 \times 1000 \times 549 \\ &= 1372,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan RSNI T-02-2004 (Perencanaan struktur beton untuk jembatan), pasal 5.1.1.5 diperlukan tulangan minimum sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{\sqrt{f'_c}}{4 f_y} b_w \cdot d \\ &= \frac{\sqrt{49,8}}{4 \times 400} \times 1000 \times 549 \\ &= 2421,4 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dan tidak lebih kecil dari:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{1,4}{f_y} b_w d \\ &= \frac{1,4}{400} \times 1000 \times 549 \\ &= 1921,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$A_s (1372,5) < A_{s \text{ min}} (2421,4)$, maka $A_{s \text{ min}}$ yang menentukan dalam pengambilan tulangan utama. Maka digunakan tulangan D 29 – 150 ($A_s = 2835 \text{ mm}^2$).

Tulangan pembagi:

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{0,18 \times b \times h}{100} \\ &= \frac{0,18 \times 1000 \times 600}{100} \\ &= 1080 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka untuk tulangan bagi digunakan tulangan D 13 – 100 ($A_s = 1327 \text{ mm}^2$).

4.18.2. Pelat Bawah

Tebal pelat bawah (t_3) = 400 mm

Digunakan tulangan (D) = 22 mm

$b_w = 1000$ mm

Beton *dacking* = 40 mm

$$d_x = 400 - 40 - \frac{22}{2} = 349 \text{ mm}$$

$f'c = 49,8$ Mpa

$f_y = 400$ Mpa

$\emptyset = 0,8$

Direncanakan $\rho = 0,0025$

$$\begin{aligned} A_s &= \rho \times b \times d_x \\ &= 0,0025 \times 1000 \times 349 \\ &= 872,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan RSNI T-02-2004 (Perencanaan struktur beton untuk jembatan), pasal 5.1.1.5 diperlukan tulangan minimum sebagai berikut:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{\sqrt{f'c}}{4 f_y} b_w d \\ &= \frac{\sqrt{49,8}}{4 \times 400} \times 1000 \times 349 \\ &= 1539,3 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Dan tidak boleh lebih kecil dari:

$$\begin{aligned} A_{s \text{ min}} &= \frac{1,4}{f_y} b_w \cdot d \\ &= \frac{1,4}{400} 1000 \times 349 \\ &= 1221,5 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$A_s (872,5) < A_{s \text{ min}} (1539,3)$, maka $A_{s \text{ min}}$ yang menentukan dengan pengambilan tulangan utama. Maka digunakan tulangan D 16 – 100 ($A_s = 2011 \text{ mm}^2$).

Tulangan pembagi:

$$\begin{aligned} A_s &= \frac{0,18 \times b \times h}{100} \\ &= \frac{0,18 \times 1000 \times 400}{100} \\ &= 720 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Maka untuk tulangan bagi digunakan tulangan D 10 – 100 ($A_s = 785,4 \text{ mm}^2$)

4.18.3. Pelat Atas

Tebal plat dinding (t_1) = 600 mm

Digunakan tulangan (D) = 22 mm

$b_w = 1000$ mm

Beton *dacking* = 25 mm

$$d_x = 600 - 40 - \frac{22}{2} = 549 \text{ mm}$$

$f^c = 49,8$ Mpa

$f_y = 400$ Mpa

$\emptyset = 0,8$

- **Momen yang terjadi pada slab atas**

1. Berat sendiri

Ditinjau slab lantai jembatan selebar 14 m, dengan tebal 0,60 m.

Berat beton bertulang adalah $w_c = 25$ kN/m³

Maka, berat sendiri $Q_{MS} = b \times h \times w_c = 1400 \times 0,6 \times 25 = 210$ kN/m

Momen akibat berat sendiri adalah

$$M_{MS} = \frac{1}{12} \times Q_{MS} \times s^2 = \frac{1}{12} \times 210 \times 3,3^2 = 190,58 \text{ kN/m}$$

2. Beban mati tambahan

Beban mati tambahan terdiri dari lapisan aspal dengan tebal 0,05 m dengan berat jenis 9,8 kN/m³ dan air hujan dengan asumsi tebal 0,05 dengan berat jenis 9,8 kN/m³. Maka diperoleh beban mati tambahan:

$$Q_{MA} = 1,590 \text{ kN/m}$$

Maka timbul momen pada slab sebesar:

$$M_{MA} = \frac{1}{12} \times Q_{MS} \times s^2 = \frac{1}{12} \times 1,590 \times 3,3^2 = 1,443 \text{ kN/m}$$

3. Beban truk

Diperhitungkan jembatan akan memikul beban truk dengan roda ganda yang besarnya 100 kN dengan factor beban dinamis (FBD) = 0,375. Maka beban truk:

$$P_{TT} = (1 + FBD) \times T = 137,5 \text{ kN}$$

Momen maksimum yang terjadi:

$$M_{TT} = \frac{1}{8} \times P_{TT} \times s = \frac{1}{8} \times 137,5 \times 3,3 = 56,72 \text{ kN/m}$$

4. Beban angin

Dengan koefisien seret $C_w = 1,3$ dengan kecepatan angin rencana 30 m/s^2 , maka besar beban angin:

$$T_{EW} = 0,0012 \times C_w \times V_w^2 = 0,0012 \times 1,3 \times 30^2 = 1,404 \text{ kN.}$$

Diasumsikan tinggi kendaraan yang ditiup angin $h = 2 \text{ m}$ dan jarak roda $x = 1,75 \text{ m}$.

Maka transfer beban angin ke lantai jembatan:

$$P_{EW} = \frac{1}{2} \times \frac{h}{x} \times T_{EW} = \frac{1}{2} \times \frac{2}{1,75} \times 1,404 = 0,82 \text{ kN}$$

Maka momen yang terjadi akibat beban angin:

$$M_{EW} = \frac{1}{8} \times P_{EW} \times s = \frac{1}{8} \times 0,82 \times 3,3 = 0,338 \text{ kN/m}$$

Total momen pada slab atas box girder adalah $M_u = 268,5 \text{ kNm}$

Factor reduksi untuk komponen lentur $\phi = 0,8$

$$\rho_b = \frac{(\beta_1 \times 0,85 \times \frac{f'_c}{f_y} \times 600)}{600 + f_y} = \frac{(0,013 \times 0,85 \times \frac{49800}{240} \times 600)}{600 + 240} = \mathbf{1,64}$$

$$R_{\max} = 0,75 \times \rho_b \times f_y \left[\left(\frac{1 - \frac{1}{2} \times 0,75 \times \rho_b \times f_y}{0,85 \times f'_c} \right) \right] = 1,022$$

Momen nominal rencana, $M_n = M_u / \phi = 268,5 / 0,8 = 335,6 \text{ kNm}$

Factor tahanan momen nominal,

$$R_n = \frac{M_n \times 10^{-3}}{b \times d^2} = \frac{335,6 \times 10^{-3}}{b \times d^2} = 0,3356 \text{ (} R_n < R_{\max} \text{) OK!}$$

Rasio tulangan yang dibutuhkan:

$$\rho = 0,85 \times \frac{f'_c}{f_y} \times \left[1 - \sqrt{1 - \frac{2R_n}{0,85 \times f'_c}} \right] = 0,0082$$

$$\rho_{\min} = 25\% \frac{1,4}{f_y} = 0,00145$$

$$A_s = \rho \times b \times d$$

$$= 0,0082 \times 1000 \times 549$$

$$= 796,05 \text{ mm}^2$$

Maka, digunakan tulangan D13 – 100 ($A_s = 1327 \text{ mm}^2$)

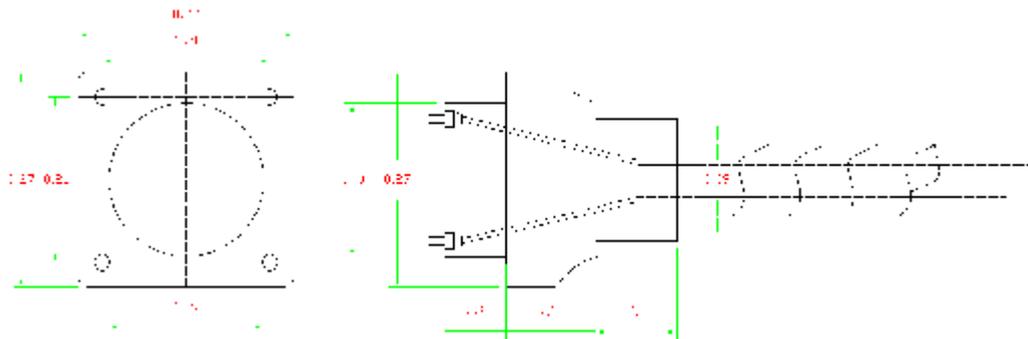
Tulangan pembagi:

$$A_s = \frac{0,18 \times b \times h}{100} = \frac{0,18 \times 1000 \times 600}{100} = 720 \text{ mm}^2$$

Maka, tulangan bagi yang digunakan adalah D13 – 100 ($A_s = 1327 \text{ mm}^2$)

4.19. Perencanaan *End Block*

Untuk daerah tumpuan digunakan angkur tipe VSL dengan rincian sebagai berikut:



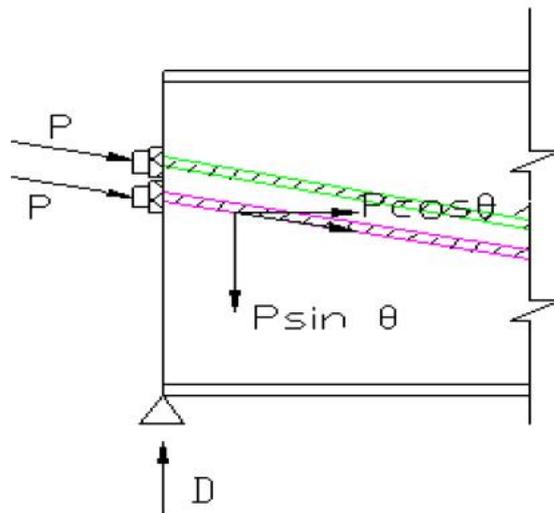
Gambar 4.13: Angkur hidup VSL type 22 Sc.

Masing-masing tendon terdiri dari 30 dan 35 – D 15,2 mm *strand*.

Tegangan *ultimit strands* = 1862,14 Mpa

Diameter selubung = 140 mm

Mutu beton saat penarikan = 48 Mpa



Persamaan kabel: $F(x) = 0,00409x^2 - 0,1536x$

$$dy/dx = 0,00818x - 0,1536$$

$$\theta = A \tan (dy/dx)$$

$$X = 37,5 \text{ m}$$

$$\theta = 3080 \tan (0,15315)$$

$$= 8,2^\circ$$

Tegangan tumpu di bawah pelat angkur:

Gaya vertical yang bekerja pada masing-masing pelat angkut pada saat penarikan:

$$P \sin \theta = 35 \times 140 \times 0,85 \times 1862,14 \times \sin 8,2^\circ = 1106,2 \text{ kN}$$

$D = 6094,0308 \text{ kN}$ (gaya geser akibat pembebanan dengan menggunakan program SAP v.11, detailnya terdapat pada lampiran).

Maka:

$$D_{\text{total}} = P \sin \theta + D$$

$$D_{\text{total}} = 1106,2 + 6094,0308 = 6541,021 \text{ kN}$$

Luas bersih pelat angkur:

$$A = 270 \times 270 - \frac{\pi \times 210^2}{4}$$
$$= 35606,5 \text{ mm}^2$$

$$f_t = \frac{P}{A} = \frac{13082,042 \times 10^3}{35606,5} = 367,41 \text{ Mpa}$$

Gaya tarik melintang:

Karena posisi kedua pelat angkur berdekatan, maka kedua gaya pelat tersebut dapat digabungkan sehingga:

$$P = 2 \times 6541,021 \text{ kN} = 13082,042 \text{ kN}$$

Gaya P gabungan ini bekerja pada pelat angkur yang mempunyai lebar 270 mm dan tinggi 270 mm, sehingga:

$$T = 0,25 \sum P \times \left(1 - \frac{a}{h}\right)$$

$$T = 0,25 \times 1308,042 \times \left(1 - \frac{270}{2500}\right)$$

$$T = 2917,3 \text{ kN}$$

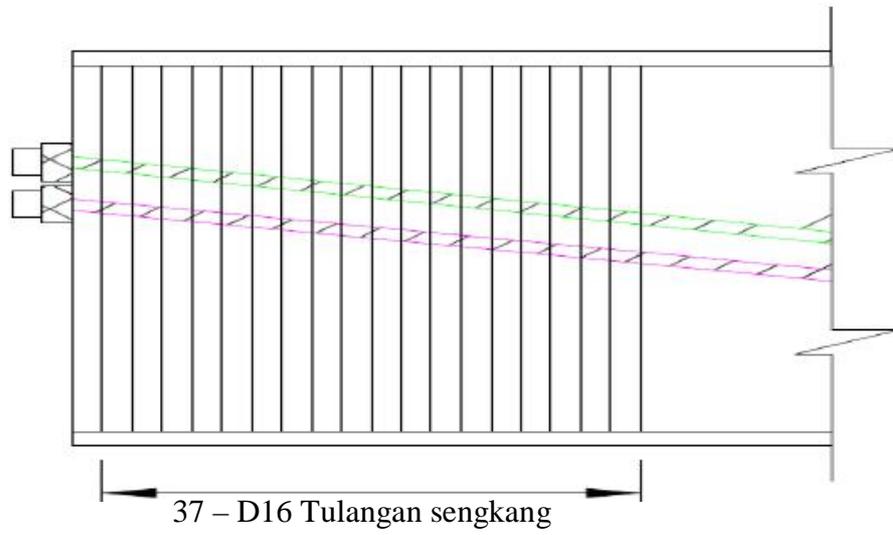
Kebutuhan tulangan melintang:

Luas tulangan yang dibutuhkan untuk menjaga agar tegangan yang terjadi pada tulangan lebih kecil dari pada $0,5 f_y$.

$$A_s = \frac{T}{0,5 f_y} = \frac{2917,3 \times 10^3}{0,5 \times 400} = 14586,5 \text{ mm}^2$$

Gunakan tulangan sengkang tertutup D 16 ($A = 201 \text{ mm}^2$) sehingga jumlah sengkang yang dibutuhkan adalah:

$$n = \frac{14586,5}{201 \times 2} = 37 \text{ sengkang}$$



Gambar 4.14: Pembesian pada *End Block*.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

5.1.1. *Box Girder Type Single Cellular*

1. Dalam perencanaan ini, direncanakan sebagai jembatan kelas I yang harus memiliki beban rencana lalu lintas sebesar 100% dari beban seluruhnya. Dengan lebar jalur lalu lintas 7 m (lajur ganda) ditambah 1,5 m lebar trotoar untuk pejalan kaki dan pada kanan dan kiri jembatan sehingga harus menggunakan 2 unit *box girder type single cellular* dengan bentang 50 m.
2. *Girder* yang digunakan berupa beton prategang tipe *box girder* berbentuk trapesium dengan spesifikasi:
Tinggi *box girder* : 2,5 m
Lebar jembatan : 2 x 8,5 m
Mutu beton pratengan : $f_c' = 49,8$ MPa
3. Untuk tendon prategang pada desain satu *box girder* digunakan 16 tendon dengan spesifikasi diameter nominal *strands* 15,2 mm berjumlah 22 kawat jenis *uncoated 7 wire super strands* ASTM A-416-06 grade 270 setiap tendon.
4. Gaya prategang awal 84354,45 kN, mengalami kehilangan prategang sebesar 14,336% sehingga tersisa tegangan efektif 72261,4 kN dari prategang akibat *jacking force* sebesar 17056,04 kN. Digunakan tegangan efektif sebesar 75%, sebesar 12792,03 kN dari gaya prategang akibat *jacking force* 100% UTS yaitu 84339,2 kN.
5. Tegangan ijin tekan beton sebesar 22410 kPa, dan tegangan ijin tarik seton sebesar 11157,95 kPa.
6. Terdapat 18 tahapan dalam proses perhitungan dan analisis struktur jembatan yang telah disusun ini sehingga dapat memberi sedikit gambaran tentang penerapan struktur beton prategang (*prestressed concrete*) pada penampang *box girder*.

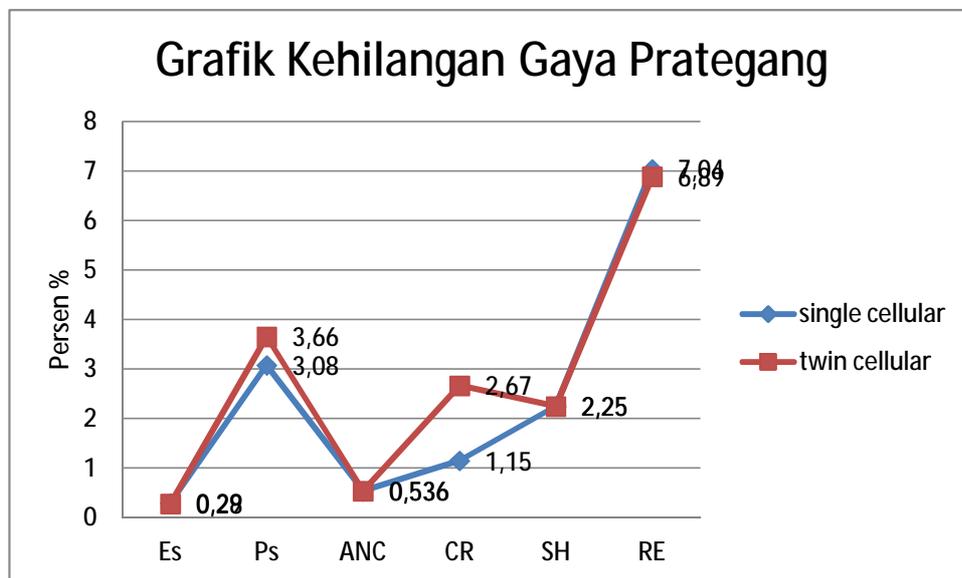
5.1.2. *Box Girder Type Twin Cellular*

1. Dalam perencanaan ini, direncanakan sebagai jembatan kelas I yang harus memiliki beban rencana lalu lintas sebesar 100% dari beban seluruhnya. Dengan lebar jalur lalu lintas 7 m (lajur ganda) ditambah 1,5 m lebar trotoar untuk pejalan kaki dan pada kanan dan kiri jembatan sehingga menggunakan *box girder type twin cellular* dengan bentang 50 m.
2. *Girder* yang digunakan berupa beton prategang tipe *box girder* berbentuk trapesium dengan spesifikasi:
Tinggi *box girder* : 2,5 m
Lebar jembatan : 17 m
Mutu beton pratengan : $f_c' = 49,8$ MPa
3. Untuk tendon prategang pada desain satu *box girder* digunakan 24 tendon yang masing-masing terdiri atas:
 - a. 16 tendon dengan spesifikasi diameter nominal *strands* 15,2 mm berjumlah 30 kawat jenis *uncoated 7 wire super strands* ASTM A-416-06 grade 270 setiap tendon.
 - b. 6 tendon dengan spesifikasi diameter nominal *strands* 15,2 mm berjumlah 35 kawat jenis *uncoated 7 wire super strands* ASTM A-416-06 grade 270 setiap tendon.
4. Gaya prategang awal 177860,5 kN, mengalami kehilangan prategang sebesar 16,606% sehingga tersisa tegangan efektif 148324,98 kN dari prategang akibat *jacking force* sebesar 50567,93 kN. Digunakan tegangan efektif sebesar 75%, sebesar 37925,96 kN dari gaya prategang akibat *jacking force* 100% UTS yaitu 177868,2 kN.
5. Tegangan ijin tekan beton sebesar 22410 kPa, dan tegangan ijin tarik seton sebesar 11157,95 kPa.
6. Terdapat 18 tahapan dalam proses perhitungan dan analisis struktur jembatan yang telah disusun ini sehingga dapat memberi sedikit gambaran tentang penerapan struktur beton prategang (*prestressed concrete*) pada penampang *box girder*

Dari kesimpulan diatas, sehingga dapat diketahui perbandingan antara *box girder type single cellular* dengan *type twin cellular* yaitu:

Tabel 6.1: Tabel perbandingan kedua *type box girder*.

Perbandingan	Box Girder	
	Type single cellular	Type twin cellular
Jumlah tendon	16	24
Gaya prategang awal	84354,45 kN	177860,5 kN
Kehilangan gaya prategang	14,166%	16,106%
Gaya akibat <i>jacking force</i>	17056,04 kN	50567,93 kN
Tegangan efektif	12792,03 kN	379,96 kN



Gambar 5.1: Grafik kehilangan gaya prategang.

Jika kita melihat dari kesimpulan diatas, dapat disimpulkan bahwasanya penggunaan *box girder type single cellular* dengan lebar jembatan 17 meter dengan panjang antar bentang 50 meter dan panjang total jembatan 150 meter lebih efektif untuk mengurangi kehilangan gaya prategang yang terlalu tinggi yaitu dengan menggunakan lajur ganda *box girder*.

5.2. Saran

Dalam proses perencanaan suatu jembatan, terlebih dahulu ditentukan kebutuhan data yang tentunya berdasarkan pada dasar teori/studi pustaka untuk mempermudah perencanaan. Penentuan kebutuhan data ini dilakukan dengan cara mencatat data yang diperlukan untuk perencanaan jembatan. Dalam perencanaan ini, agar hasilnya efisien maka perlu diketahui seperti:

1. Menentukan peta topografi jembatan yang akan dibangun sehingga nanti didapatkan elevasi jembatan yang direncanakan secara tepat dan efisien.
2. Perhitungan harga bahan untuk struktur agar didapatkan hasil yang lebih jelas dari biaya perencanaan jembatan.
3. Pemilihan metode perencanaan yang digunakan di lapangan, karena metode perencanaan yang berbeda dapat mempengaruhi waktu pengerjaan struktur dan biaya perencanaan.
4. Rencana anggaran biaya berisikan tentang besarnya volume pekerjaan serta biaya pekerjaan. Besarnya volume pekerjaan dihitung dari volume tiap item pekerjaan, sedangkan besarnya biaya pekerjaan ditentukan dari harga upah pekerja, harga bahan, analisa tiap item pekerjaan, dan harga penggunaan alat berat yang digunakan, dari pengolahan data tersebut ditambah biaya keuntungan dan biaya PPh dalam pelaksanaan pekerjaan.

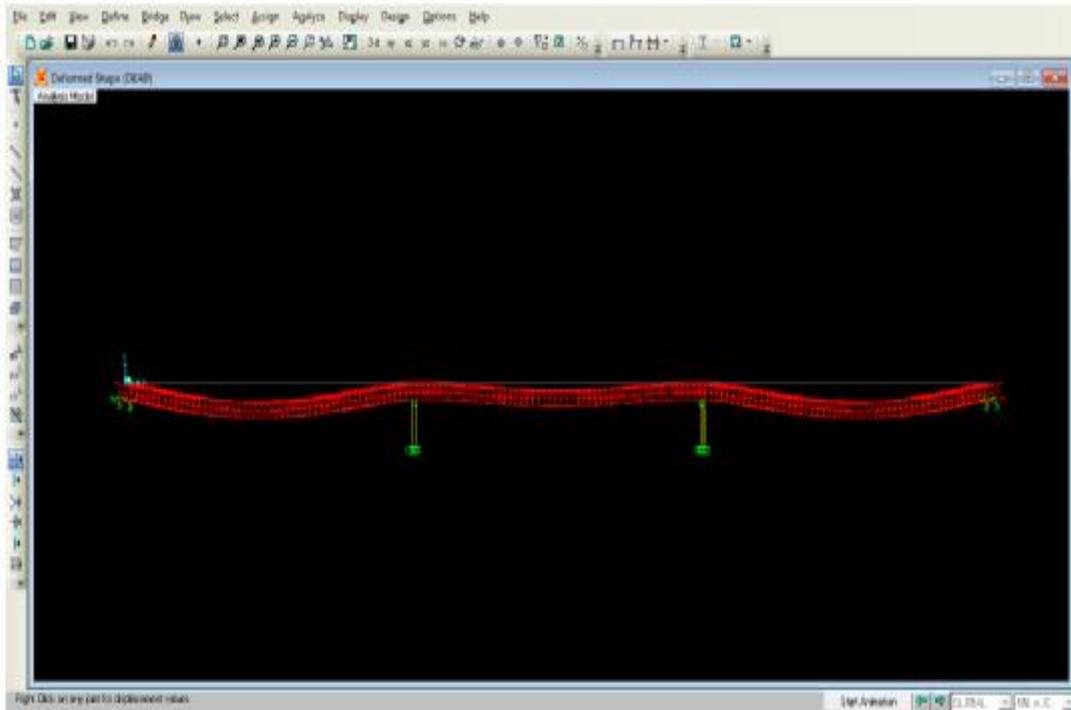
DAFTAR PUSTAKA

1. Budiadi, Andri. *Desain Praktis Beton Prategang*. Yogyakarta: Andi, 2008.
2. Fadlyn A.K. (2014) Perencanaan Flyover Menggunakan Profil Box Girder Dengan Metode Analisis Numeris. *Laporan Tugas Akhir*. Medan: Program studi Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara.
3. Lin, T.Y dan Burns, N.H. *Desain Struktur Beton Prategang Jilid I Edisi III*: Erlangga . 1993.
4. Nawy, EG., *Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar Jilid I Edisi III*:Erlangga . 2001.
5. Raju, K.N. *Beton Prategang* : Erlangga. 1988.
6. Standar Nasional Indonesia. *Standar Pembebanan Untuk Jembatan RSNI T-02 – 2005*.
7. Standar Nasional Indonesia. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI – 3 – 2847 – 2002)*. Bandung. Desember 2002.
8. Supriyadi ,Bambang dan Setyo Muntohar, Agus . *Jembatan*. 2000.
9. Wiratama A.P, Elvira dan Gatot S.B. Perhitungan Jembatan Layang (*Flyover*) Dengan Tipe *Box Girder* Beton Prategang (*Prestressed Concrete*) Untuk Pertemuan Jalan Mayor Aliyang Dan Jalan Soekarno-Hatta Kabupaten Kubu Raya. Wira_sipil@yahoo.co.id diakses tanggal 01 Februari 2018.

LAMPIRAN

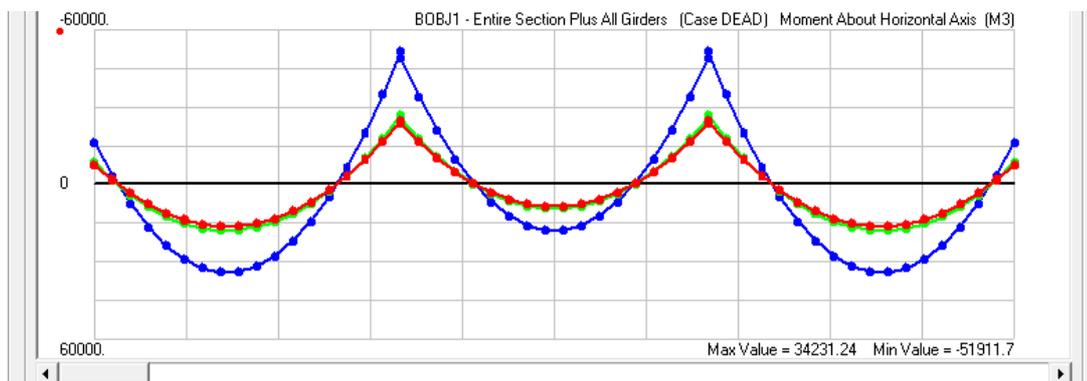
1. *Box Girder Type Single Cellular*

- a. Lendutan yang terjadi pada jembatan *box girder type single cellular*.



Gambar L.1: Lendutan yang terjadi pada jembatan.

- b. Momen yang terjadi pada jembatan *box girder type single cellular*.



Gambar L.2: Grafik momen yang terjadi pada jembatan.

Tabel L.1: Momen yang terjadi disepanjang bentang *box girder type single cellular*.

Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0	-11682.89	-4666.21	-115.59	-334.082	-4699.994	-16222.87
2.94118	-11682.89	-4033.05	-115.59	-335.023	-4360.011	-3429.852
2.94118	-11682.89	-4033.08	-115.59	-335.062	-4360.011	-3429.852
5.88235	-11682.89	-3399.99	-115.59	-336.109	-4020.028	7501.1094
5.88235	-11682.89	-3400.04	-115.59	-336.184	-4020.028	7501.1096
8.82353	-11682.89	-2766.95	-115.59	-337.22	-3680.044	16570.237
8.82353	-11682.89	-2766.98	-115.59	-337.269	-3680.044	16570.237
11.76471	-11682.89	-2133.95	-115.59	-338.393	-3340.061	23777.494
11.76471	-11682.89	-2134.03	-115.59	-338.51	-3340.061	23777.494
14.70588	-11682.89	-1501.1	-115.59	-339.798	-3000.078	29123.292
14.70588	-11682.89	-1501.16	-115.59	-339.887	-3000.078	29123.291
17.64706	-11682.89	-868.251	-115.59	-341.186	-2660.095	32607.747
17.64706	-11682.89	-868.399	-115.59	-341.4	-2660.096	32607.747
20.58824	-11682.89	-235.545	-115.59	-342.779	-2320.113	34231.236
20.58824	-11682.89	-235.694	-115.59	-342.997	-2320.113	34231.236
23.52941	-11682.89	397.279	-115.59	-344.215	-1980.13	33993.639
23.52941	-11682.89	397.108	-115.59	-344.462	-1980.131	33993.639
26.47059	-11682.89	1030.07	-115.59	-345.687	-1640.149	31894.786
26.47059	-11682.89	1029.93	-115.59	-345.892	-1640.149	31894.786
29.41176	-11682.9	1662.83	-115.59	-347.197	-1300.167	27934.858
29.41176	-11682.89	1662.76	-115.59	-347.305	-1300.166	27934.859
32.35294	-11682.9	2295.79	-115.59	-348.431	-960.1834	22113.454
32.35294	-11682.89	2295.78	-115.59	-348.444	-960.1819	22113.456
35.29412	-11682.89	2928.77	-115.59	-349.635	-620.1966	14430.265
35.29412	-11682.89	2928.68	-115.59	-349.771	-620.1961	14430.266
38.23529	-11682.89	3561.64	-115.59	-350.988	-280.2144	4885.6729
38.23529	-11682.89	3561.56	-115.59	-351.1	-280.2144	4885.673
41.17647	-11682.89	4194.67	-115.59	-352.117	59.771	-6520.59
41.17647	-11682.89	4194.63	-115.59	-352.176	59.7694	-6520.591
44.11765	-11682.89	4827.76	-115.59	-353.167	399.7536	-19788.81
44.11765	-11682.89	4827.73	-115.59	-353.209	399.752	-19788.81
47.05882	-11682.89	5460.88	-115.59	-354.161	739.7357	-34919.13
47.05882	-11682.89	5460.89	-115.59	-354.155	739.737	-34919.13
50	-11682.89	6094.05	-115.59	-355.091	1079.721	-51911.68
50	-10896.02	-5381.65	0.022	8.7938	896.4763	-49039.19
52.94118	-10896.02	-4748.47	0.022	7.8802	896.4112	-34141.94
52.94118	-10896.02	-4748.48	0.022	7.8736	896.4113	-34141.94
55.88235	-10896.02	-4115.3	0.022	6.9502	896.3473	-21106.98

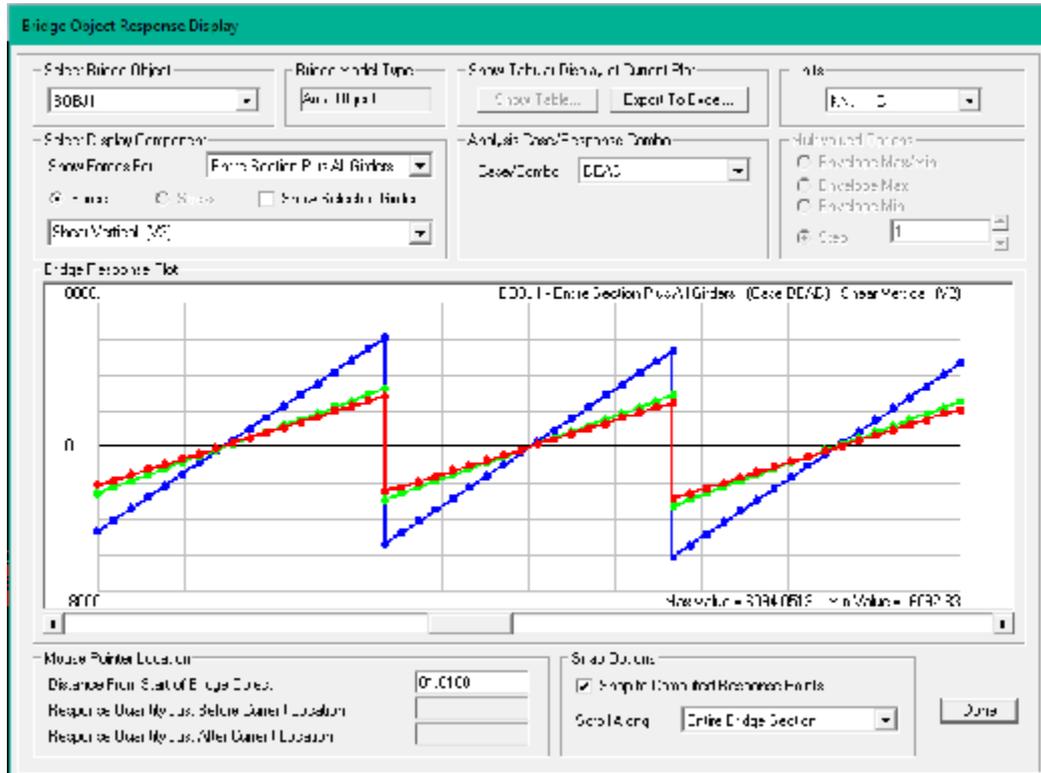
Tabel L.1: *Lanjutan.*

Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
55.88235	-10896.02	-4115.31	0.022	6.9433	896.3473	-21106.98
58.82353	-10896.02	-3482.14	0.022	6.0189	896.2835	-9934.264
58.82353	-10896.02	-3482.15	0.022	5.992	896.2835	-9934.264
61.76471	-10896.02	-2849	0.022	5.0414	896.2196	-623.7455
61.76471	-10896.02	-2849.04	0.022	4.9839	896.2194	-623.7457
64.70588	-10896.02	-2215.9	0.022	4.0164	896.1557	6824.6692
64.70588	-10896.02	-2215.9	0.022	4.0049	896.1559	6824.6695
67.64706	-10896.02	-1582.8	0.022	2.9835	896.0923	12411.017
67.64706	-10896.02	-1582.83	0.022	2.9353	896.0924	12411.017
70.58824	-10896.02	-949.736	0.022	1.8984	896.0282	16135.372
70.58824	-10896.02	-949.768	0.022	1.8527	896.0282	16135.371
73.52941	-10896.02	-316.714	0.022	0.754	895.9641	17997.857
73.52941	-10896.02	-316.761	0.022	0.6872	895.9641	17997.857
76.47059	-10896.02	316.285	0.022	-0.4191	895.9001	17998.557
76.47059	-10896.02	316.22	0.022	-0.5109	895.9	17998.557
79.41176	-10896.02	949.26	0.022	-1.6277	895.8361	16137.545
79.41176	-10896.02	949.236	0.022	-1.6619	895.8361	16137.545
82.35294	-10896.02	1582.35	0.022	-2.6699	895.7722	12414.614
82.35294	-10896.02	1582.34	0.022	-2.695	895.7724	12414.614
85.29412	-10896.02	2215.45	0.022	-3.6987	895.7082	6829.6347
85.29412	-10896.02	2215.44	0.022	-3.7215	895.7082	6829.6348
88.23529	-10896.02	2848.59	0.022	-4.6795	895.6441	-617.4523
88.23529	-10896.02	2848.56	0.022	-4.7232	895.644	-617.4525
91.17647	-10896.02	3481.72	0.022	-5.6575	895.5792	-9926.673
91.17647	-10896.02	3481.71	0.022	-5.6814	895.5791	-9926.674
94.11765	-10896.02	4114.87	0.022	-6.6137	895.5151	-21098.11
94.11765	-10896.02	4114.87	0.022	-6.627	895.5151	-21098.11
97.05882	-10896.02	4748.04	0.022	-7.5457	895.4511	-34131.79
97.05882	-10896.02	4748.04	0.022	-7.5499	895.4511	-34131.79
100	-10896.02	5381.22	0.022	-8.4629	895.3882	-49027.76
100	-11681.6	-6092.83	115.482	356.264	1078.373	-51896.02
102.9412	-11681.59	-5459.67	115.482	355.335	738.7219	-34907.05
102.9412	-11681.59	-5459.68	115.482	355.308	738.7222	-34907.05
105.8824	-11681.59	-4826.55	115.482	354.333	399.0697	-19780.25
105.8824	-11681.59	-4826.56	115.482	354.315	399.0702	-19780.25
108.8235	-11681.59	-4193.43	115.482	353.322	59.4187	-6515.559
108.8235	-11681.59	-4193.47	115.482	353.265	59.4195	-6515.558
111.7647	-11681.59	-3560.36	115.482	352.259	-280.2319	4887.1551

Tabel L.1: *Lanjutan.*

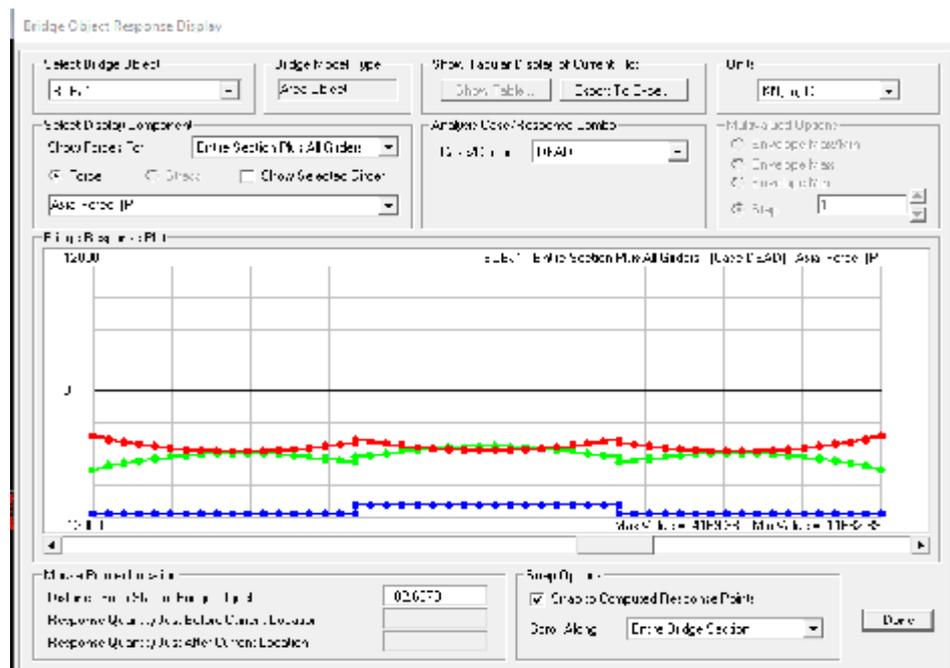
Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
111.765	-11681.591	-3560.463	115.482	352.105	-280.230	4887.157
114.706	-11681.591	-2927.463	115.482	350.932	-619.883	14428.192
114.706	-11681.590	-2927.503	115.482	350.873	-619.881	14428.194
117.647	-11681.590	-2294.529	115.482	349.661	-959.535	22107.647
117.647	-11681.591	-2294.595	115.482	349.564	-959.535	22107.646
120.588	-11681.591	-1661.482	115.482	348.550	-1299.188	27925.393
120.588	-11681.591	-1661.553	115.482	348.447	-1299.189	27925.393
123.529	-11681.590	-1028.569	115.482	347.251	-1638.840	31881.466
123.529	-11681.590	-1028.642	115.482	347.149	-1638.839	31881.467
126.471	-11681.590	-395.724	115.482	345.858	-1978.492	33976.044
126.471	-11681.590	-395.775	115.482	345.782	-1978.491	33976.044
129.412	-11681.590	237.105	115.482	344.433	-2318.145	34209.443
129.412	-11681.590	236.960	115.482	344.222	-2318.145	34209.443
132.353	-11681.590	869.891	115.482	342.945	-2657.797	32581.856
132.353	-11681.590	869.878	115.482	342.926	-2657.798	32581.855
135.294	-11681.590	1502.668	115.482	341.447	-2997.450	29092.814
135.294	-11681.590	1501.796	115.482	340.198	-2997.450	29092.814
138.235	-11681.590	2133.509	115.482	337.202	-3337.102	23746.630
138.235	-11681.590	2132.255	115.482	335.405	-3337.102	23746.630
141.176	-11681.590	2764.282	115.482	332.860	-3676.755	16546.033
141.176	-11681.590	2764.504	115.482	333.166	-3676.755	16546.033
144.118	-11681.590	3397.385	115.482	331.814	-4016.408	7483.877
144.118	-11681.591	3396.828	115.482	331.026	-4016.408	7483.877
147.059	-11681.591	4030.072	115.482	330.197	-4356.061	-3437.925
147.059	-11681.591	4029.740	115.482	329.728	-4356.061	-3437.925
150.000	-11681.591	4662.818	115.482	328.669	-4695.714	-16221.067

c. Gaya geser yang terjadi pada jembatan *box girder type single cellular*.



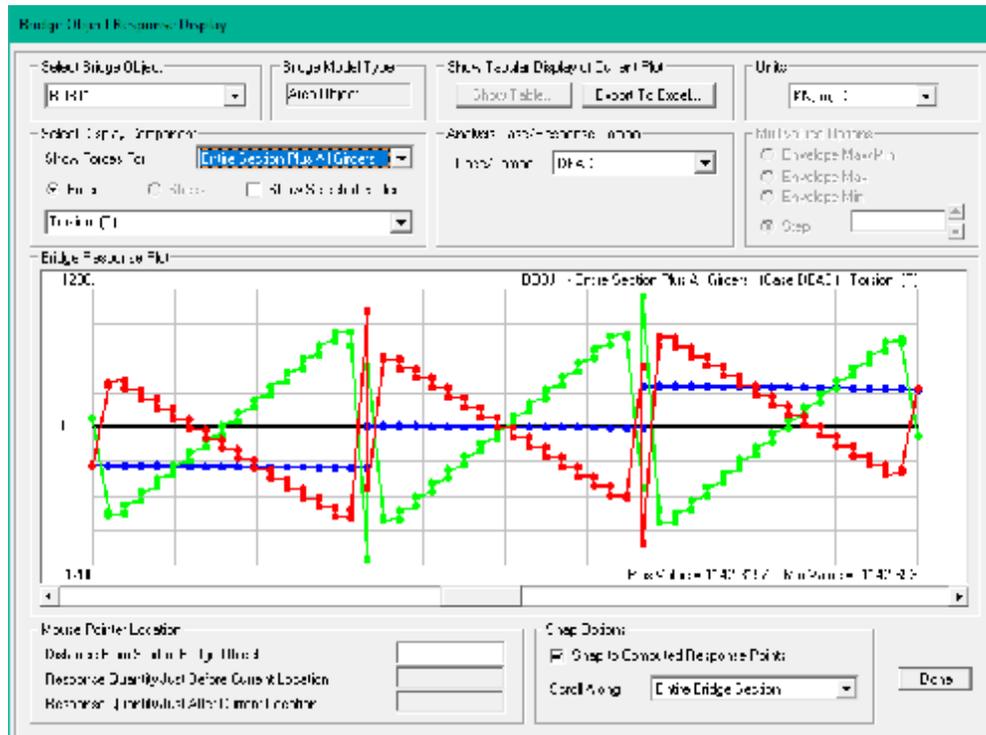
Gambar L.3: Grafik gaya geser yang terjadi pada jembatan.

d. Gaya aksial yang terjadi pada jembatan *box girder type single cellular*.



Gambar L.4: Grafik gaya aksial yang terjadi pada jembatan.

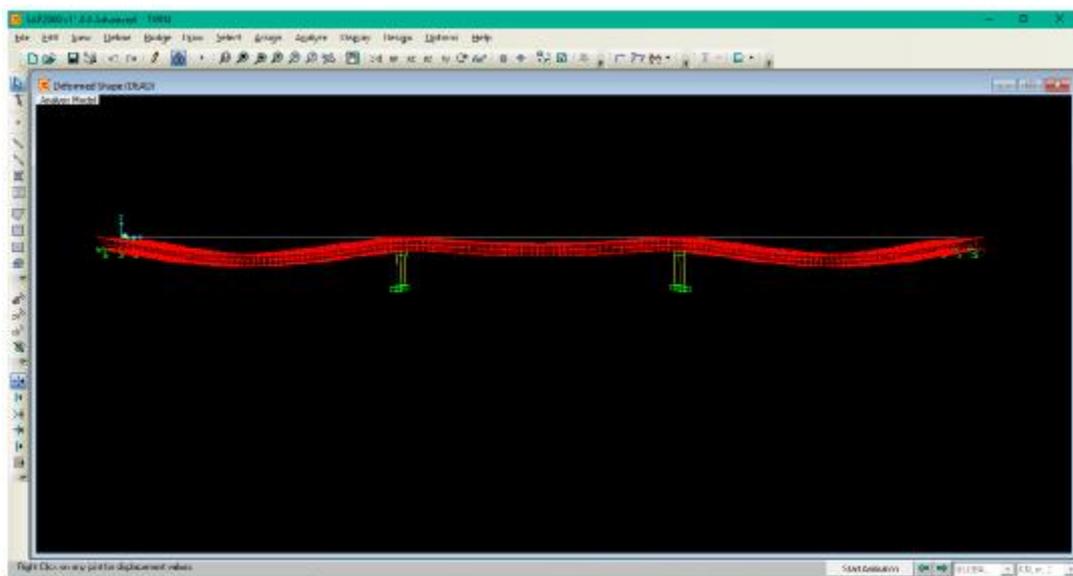
- e. Gaya torsi yang terjadi pada jembatan *box girder type single cellular*.



Gambar L.5: Grafik gaya torsi yang terjadi pada jembatan.

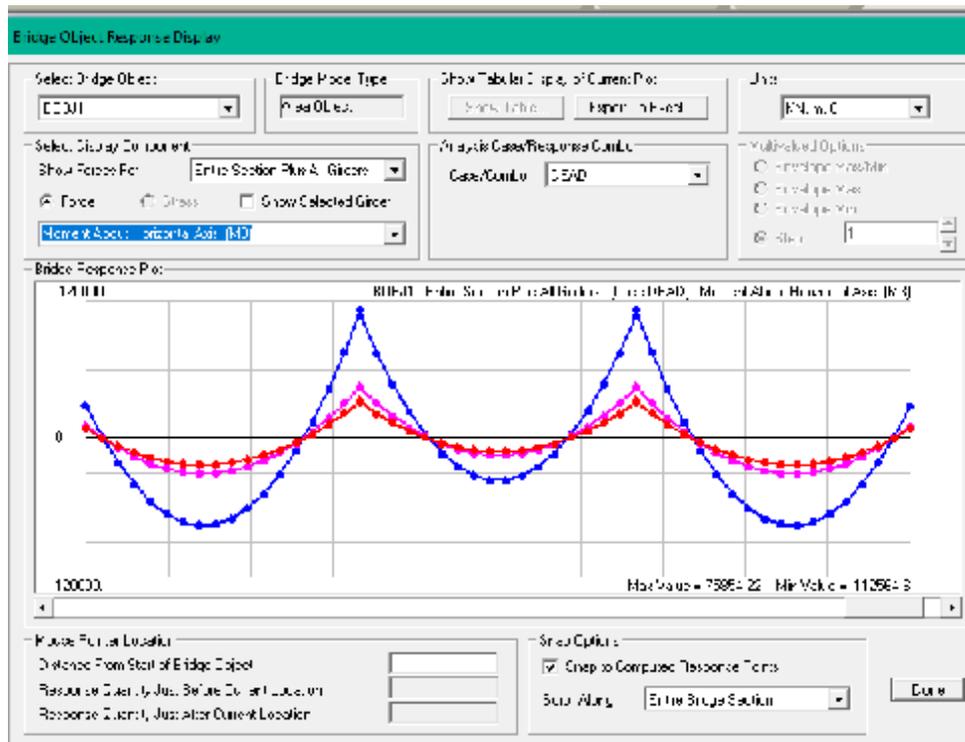
2. Box Girder Type Twin Cellular

1. Lendutan yang terjadi pada jembatan *type twin cellular*.



Gambar L.6: Lendutan yang terjadi pada jembatan.

2. Momen yang terjadi pada jembatan *type twin cellular*.



Gambar L.7: Grafik momen yang terjadi pada jembatan.

Tabel L.2: Momen yang terjadi pada jembatan *box girder*.

Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
0	-21874.794	-9803.036	-1.67E-07	-5.28E-09	1.32E-07	-28637.866
2.94118	-21874.794	-8452.263	-1.67E-07	-8.24E-09	6.31E-07	-1791.8392
2.94118	-21874.794	-8452.263	-1.67E-07	-1.42E-08	7.11E-07	-1791.8392
5.88235	-21874.794	-7101.49	-1.68E-07	-3.36E-08	1.32E-06	21081.3258
5.88235	-21874.794	-7101.49	-1.68E-07	-1.58E-08	1.23E-06	21081.3258
8.82353	-21874.794	-5750.717	-1.67E-07	-5.62E-08	1.67E-06	39981.629
8.82353	-21874.794	-5750.717	-1.67E-07	-7.32E-08	1.48E-06	39981.629
11.76471	-21874.794	-4399.944	-1.67E-07	-9.76E-08	1.96E-06	54909.0705
11.76471	-21874.794	-4399.944	-1.68E-07	-9.51E-08	1.93E-06	54909.0705
14.70588	-21874.794	-3049.171	-1.67E-07	-3.74E-08	2.40E-06	65863.6502
14.70588	-21874.794	-3049.171	-1.67E-07	-5.88E-08	2.36E-06	65863.6502
17.64706	-21874.794	-1698.398	-1.67E-07	-1.12E-08	2.98E-06	72845.3681
17.64706	-21874.794	-1698.398	-1.67E-07	5.23E-08	3.10E-06	72845.3681
20.58824	-21874.794	-347.625	-1.65E-07	7.01E-08	3.54E-06	75854.2242
20.58824	-21874.794	-347.625	-1.65E-07	7.27E-08	3.38E-06	75854.2242
23.52941	-21874.794	1003.148	-1.63E-07	-2.37E-08	4.54E-06	74890.2186
23.52941	-21874.794	1003.148	-1.63E-07	-5.08E-08	4.60E-06	74890.2186
26.47059	-21874.794	2353.921	-1.63E-07	-7.06E-08	4.96E-06	69953.3512

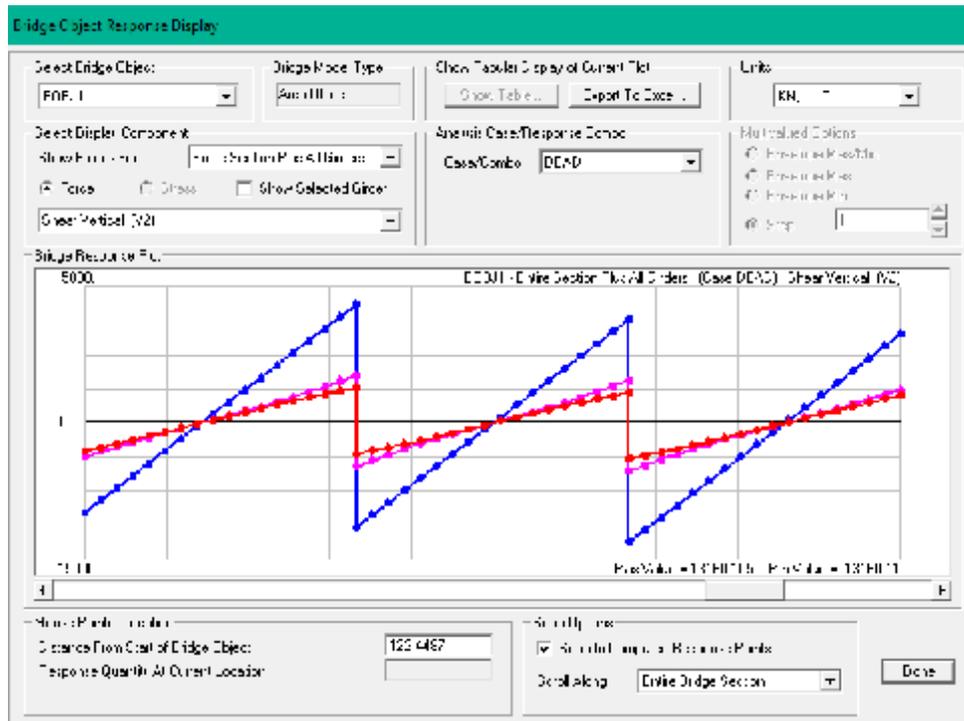
Tabel L.2: Lanjutan.

Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
26.47059	-21874.794	2353.921	-1.63E-07	-6.40E-08	5.72E-06	69953.3512
29.41176	-21874.794	3704.694	-1.62E-07	-1.21E-07	-1.62E-07	61043.6221
29.41176	-21874.794	3704.694	-1.62E-07	-8.07E-08	-1.05E-07	61043.6221
32.35294	-21874.794	5055.467	-1.60E-07	-1.19E-07	-1.86E-06	48161.0311
32.35294	-21874.794	5055.467	-1.60E-07	-1.22E-07	-2.11E-06	48161.0311
35.29412	-21874.794	6406.24	-1.61E-07	-8.16E-08	-2.60E-06	31305.5784
35.29412	-21874.794	6406.24	-1.61E-07	-1.26E-07	-2.51E-06	31305.5784
38.23529	-21874.794	7757.013	-1.62E-07	-8.78E-08	-2.44E-06	10477.2639
38.23529	-21874.794	7757.013	-1.63E-07	-7.24E-08	-2.78E-06	10477.2639
41.17647	-21874.794	9107.786	-1.64E-07	-9.01E-08	-2.47E-06	-14323.9123
41.17647	-21874.794	9107.786	-1.64E-07	-9.89E-08	-2.01E-06	-14323.9123
44.11765	-21874.794	10458.559	-1.64E-07	-8.80E-08	-2.51E-06	-43097.9503
44.11765	-21874.794	10458.559	-1.64E-07	-7.44E-08	-2.97E-06	-43097.9503
47.05882	-21874.794	11809.332	-1.64E-07	-7.12E-08	-2.74E-06	-75844.8501
47.05882	-21874.794	11809.332	-1.65E-07	-6.14E-08	-1.53E-06	-75844.8501
50	-21874.794	13160.105	-1.65E-07	-6.15E-08	-1.73E-06	-112564.612
50	-20444.627	-11481.571	-3.79E-09	1.16E-07	-1.31E-06	-106704.089
52.94118	-20444.627	-10130.798	-3.85E-09	1.17E-07	-1.40E-06	-74921.1953
52.94118	-20444.627	-10130.798	-3.91E-09	1.17E-07	-1.36E-06	-74921.1953
55.88235	-20444.627	-8780.025	-3.98E-09	1.21E-07	-1.31E-06	-47111.1629
55.88235	-20444.627	-8780.025	-3.85E-09	1.20E-07	-1.49E-06	-47111.1629
58.82353	-20444.627	-7429.252	-3.99E-09	1.13E-07	-1.47E-06	-23273.9923
58.82353	-20444.627	-7429.252	-4.03E-09	1.24E-07	-1.52E-06	-23273.9923
61.76471	-20444.627	-6078.479	-4.46E-09	1.19E-07	-1.65E-06	-3409.6835
61.76471	-20444.627	-6078.479	-4.43E-09	1.15E-07	-1.62E-06	-3409.6835
64.70588	-20444.627	-4727.706	-4.97E-09	1.10E-07	-1.70E-06	12481.7636
64.70588	-20444.627	-4727.706	-4.77E-09	1.17E-07	-1.71E-06	12481.7636
67.64706	-20444.627	-3376.933	-5.15E-09	7.48E-08	-1.79E-06	24400.3489
67.64706	-20444.627	-3376.933	-5.19E-09	6.04E-08	-1.78E-06	24400.3489
70.58824	-20444.627	-2026.16	-5.37E-09	1.88E-09	-1.86E-06	32346.0725
70.58824	-20444.627	-2026.16	-5.39E-09	-1.50E-08	-1.81E-06	32346.0725
73.52941	-20444.627	-675.387	-5.80E-09	-3.88E-08	-1.78E-06	36318.9343
73.52941	-20444.627	-675.387	-5.84E-09	-3.82E-08	-1.74E-06	36318.9343
76.47059	-20444.627	675.387	-6.23E-09	-4.89E-08	-1.72E-06	36318.9343
76.47059	-20444.627	675.387	-6.34E-09	-4.72E-08	-1.71E-06	36318.9343
79.41176	-20444.627	2026.16	-6.47E-09	-6.04E-08	-1.62E-06	32346.0725
79.41176	-20444.627	2026.16	-6.42E-09	-3.63E-08	-1.60E-06	32346.0725
82.35294	-20444.627	3376.933	-6.54E-09	-5.69E-08	-1.47E-06	24400.3489
82.35294	-20444.627	3376.933	-6.54E-09	-7.97E-08	-1.42E-06	24400.3489
85.29412	-20444.627	4727.706	-6.86E-09	-5.27E-08	-1.16E-06	12481.7636
85.29412	-20444.627	4727.706	-6.98E-09	-4.95E-08	-1.09E-06	12481.7636
88.23529	-20444.627	6078.479	-7.18E-09	-6.57E-08	-1.17E-06	-3409.6835
88.23529	-20444.627	6078.479	-7.22E-09	-7.01E-08	-1.20E-06	-3409.6835
91.17647	-20444.627	7429.252	-7.33E-09	-7.61E-08	-1.26E-06	-23273.9923
91.17647	-20444.627	7429.252	-7.37E-09	-7.75E-08	-1.17E-06	-23273.9923
94.11765	-20444.627	8780.025	-7.22E-09	-8.46E-08	-1.16E-06	-47111.1629
94.11765	-20444.627	8780.025	-7.24E-09	-8.57E-08	-1.13E-06	-47111.1629

Tabel L.2: *Lanjutan.*

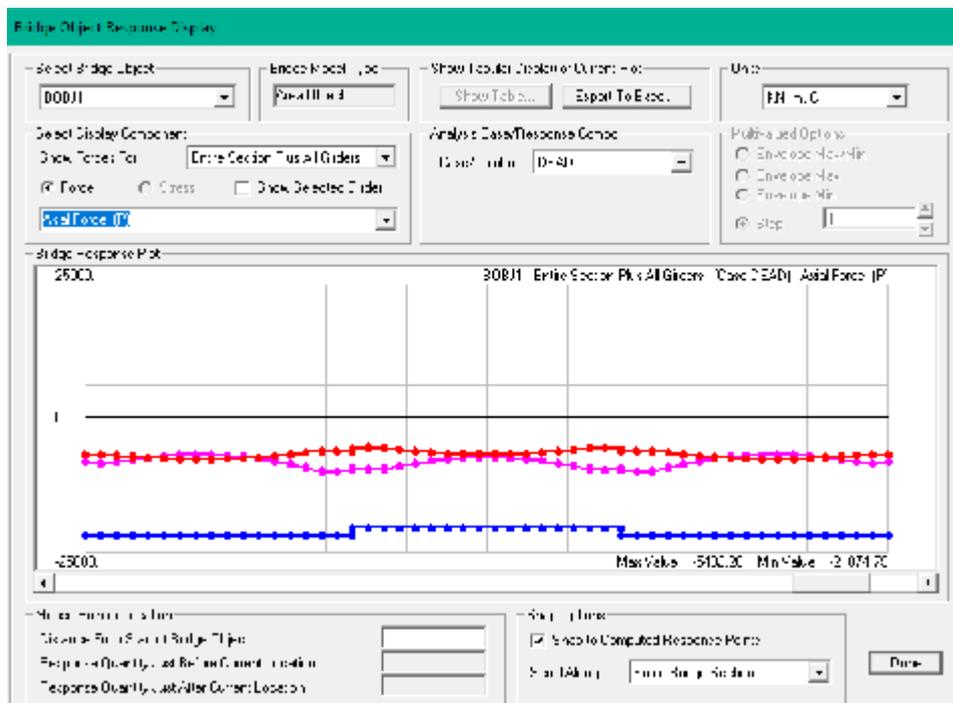
Distance m	P KN	V2 KN	V3 KN	T KN-m	M2 KN-m	M3 KN-m
97.05882	-20444.627	10130.798	-7.29E-09	-8.60E-08	-1.28E-06	-74921.1953
97.05882	-20444.627	10130.798	-7.29E-09	-8.71E-08	-1.15E-06	-74921.1953
100	-20444.627	11481.571	-7.22E-09	-9.02E-08	-1.32E-06	-106704.089
100	-21874.794	-13160.105	1.05E-07	3.52E-07	-9.31E-07	-112564.612
102.94118	-21874.794	-11809.332	1.05E-07	3.51E-07	-8.48E-07	-75844.8501
102.94118	-21874.794	-11809.332	1.05E-07	3.59E-07	-1.24E-06	-75844.8501
105.88235	-21874.794	-10458.559	1.05E-07	3.45E-07	-1.04E-06	-43097.9503
105.88235	-21874.794	-10458.559	1.05E-07	3.50E-07	-9.18E-08	-43097.9503
108.82353	-21874.794	-9107.786	1.05E-07	2.92E-07	-2.16E-06	-14323.9123
108.82353	-21874.794	-9107.786	1.05E-07	2.87E-07	-1.60E-06	-14323.9123
111.76471	-21874.794	-7757.013	1.05E-07	2.63E-07	-1.84E-06	10477.2639
111.76471	-21874.794	-7757.013	1.05E-07	2.39E-07	-5.02E-07	10477.2639
114.70588	-21874.794	-6406.24	1.04E-07	2.00E-07	-7.57E-08	31305.5784
114.70588	-21874.794	-6406.24	1.04E-07	2.57E-07	1.13E-06	31305.5784
117.64706	-21874.794	-5055.467	1.03E-07	1.72E-07	2.53E-06	48161.0311
117.64706	-21874.794	-5055.467	1.03E-07	1.48E-07	3.06E-06	48161.0311
120.58824	-21874.794	-3704.694	1.02E-07	1.37E-07	2.19E-06	61043.6221
120.58824	-21874.794	-3704.694	1.02E-07	1.62E-07	2.32E-06	61043.6221
123.52941	-21874.794	-2353.921	1.01E-07	1.11E-07	1.12E-06	69953.3512
123.52941	-21874.794	-2353.921	1.01E-07	6.58E-08	2.15E-06	69953.3512
126.47059	-21874.794	-1003.148	9.99E-08	-6.62E-08	2.43E-06	74890.2186
126.47059	-21874.794	-1003.148	1.00E-07	-5.89E-08	2.77E-06	74890.2186
129.41176	-21874.794	347.625	9.93E-08	-1.90E-07	2.91E-06	75854.2242
129.41176	-21874.794	347.625	9.94E-08	-2.56E-07	2.47E-06	75854.2242
132.35294	-21874.794	1698.398	9.98E-08	-1.72E-07	1.64E-06	72845.3681
132.35294	-21874.794	1698.398	9.98E-08	-1.63E-07	1.83E-06	72845.3681
135.29412	-21874.794	3049.171	1.01E-07	-2.63E-07	1.39E-06	65863.6502
135.29412	-21874.794	3049.171	1.02E-07	-2.87E-07	1.38E-06	65863.6502
138.23529	-21874.794	4399.944	1.03E-07	-3.04E-07	1.14E-06	54909.0705
138.23529	-21874.794	4399.944	1.03E-07	-3.13E-07	1.13E-06	54909.0705
141.17647	-21874.794	5750.717	1.03E-07	-3.67E-07	8.44E-07	39981.629
141.17647	-21874.794	5750.717	1.04E-07	-3.56E-07	9.82E-07	39981.629
144.11765	-21874.794	7101.49	1.04E-07	-3.78E-07	6.40E-07	21081.3258
144.11765	-21874.794	7101.49	1.04E-07	-3.80E-07	5.84E-07	21081.3258
147.05882	-21874.794	8452.263	1.05E-07	-3.94E-07	1.87E-07	-1791.8392
147.05882	-21874.794	8452.263	1.05E-07	-4.06E-07	1.86E-07	-1791.8392
150	-21874.794	9803.036	1.05E-07	-4.11E-07	-9.10E-08	-28637.866

c. Gaya geser yang terjadi pada jembatan *box girder*.



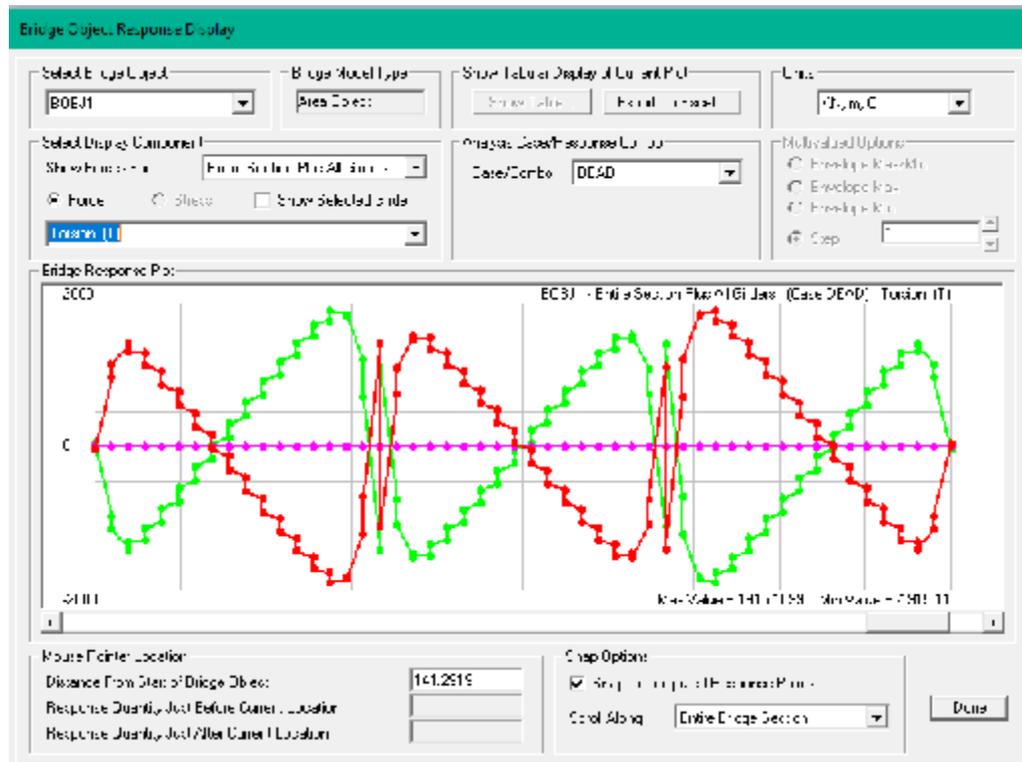
Gambar L.8: Grafik gaya geser yang terjadi pada jembatan.

d. Gaya aksial yang terjadi pada jembatan *box girder*.



Gambar L.9: Grafik momen aksial yang terjadi pada jembatan.

e. Gaya torsi yang terjadi pada jembatan box gorder.



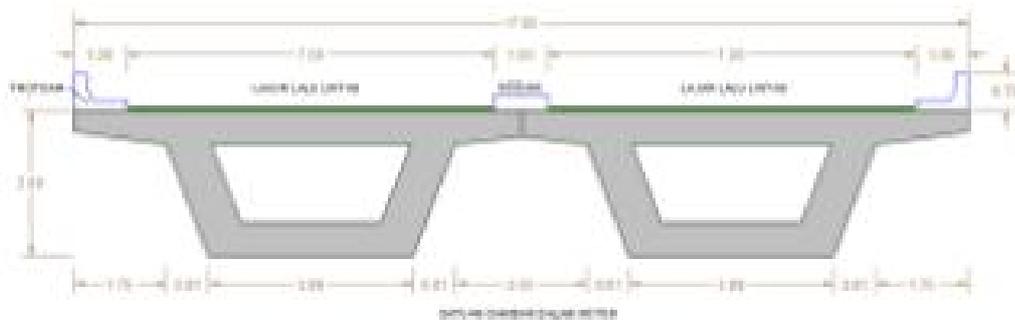
Gambar L.10: Grafik momen torsi yang terjadi pada jembatan.

3. Benchmarking

Dengan ini penulis ingin membuktikan bahwasanya perhitungan perencanaan yang ditulis sudah memenuhi syarat perencanaan sebuah jembatan dengan cara menghitung ulang perencanaan pada Jembatan Layang (*flyover*) Untuk Pertemuan Jalan Mayor Aliyang dan Jalan Soekarno-Hatta, Kabupaten Kubu Raya, Kalimantan Timur, menggunakan cara analisis perhitungan yang penulis gunakan dalam merencanakan suatu jembatan dengan spesifikasi yang telah ada pada flyover tersebut.

3.1. Perencanaan Awal (*Primeliminary Design*)

Dibawah ini adalah model potongan melintang dari *flyover* tersebut.



Gambar L.11: Balok *box girder* beton prategang.

3.1.1. Data Umum Jembatan

1. Panjang bentang jembatan layang keseluruhan adalah 632 meter, tetapi perhitungan dan analisa dilakukan pada struktur atas (*super structures*) bagian tengah dengan elevasi mendatar setinggi 9 meter yang memiliki panjang 300 meter.
2. Kelas jembatan layang direncanakan jembatan kelas I. Dengan lebar jalur lalu-lintas 7 meter (lajur ganda) bermedian 1 meter ditambah 1 meter lebar trotoar untuk pejalan kaki dan sandaran pada kanan dan kiri jembatan.
3. Panjang bentang jembatan 300 meter.
4. Panjang balok box girder prategang 300 meter dibagi menjadi 5 segmen dengan masing-masing bentang 60 meter.
5. Tebal slab lantai jembatan (h) = 0,65 meter.

6. Tebal aspal (h_a) = 0,05 meter.
7. Tinggi genangan air hujan (h_g) = 0,05 meter.
8. Tebal trotoar (h_t) = 0,20 meter.

3.1.2. Data Box Girder Sebagai Balok Prategang

1. γ beton prategang = 25,50 kN/m³
2. Mutu beton prategang = K-500
3. Kuat tekan beton $f_c' = 0,83 \times (500/10) = 41,50$ MPa
4. Digunakan gelagar memanjang dengan penampang *box girder*

3.1.3. Data *Strand Cable* – Standar VSL (Tendon Balok Prategang)

1. Jenis *strand* : *Uncoated Seven Wire Super Strands* ASTM A-416-06 Grade 270
2. Tegangan leleh *strand* = $f_{py} = 1675$ MPa
3. Kuat tarik *strand* = $f_{pu} = 1860$ MPa
4. Diameter nominal *strands* = 12,7 mm = ½ inch
5. Luas tampang nominal satu *strands* = $A_{st} = 100$ mm²
6. Beban putus (P_{bs})= 183,70 kN (100 % UTS atau 100% beban putus)
7. Jumlah kawat untai (*strands cable*) = 22 kawat untai/tendon
8. Diameter selubung ideal = 76 mm
9. Luas tampang *strands* = 22×100 mm² = 2200 mm² – (15% x 2200)= 1880 mm²
10. Tipe Angkur= VSL Type E 5-22 *Stressing Anchorage*

3.1.4. Data Sekunder Jembatan

Mutu beton untuk slab lantai jembatan:

1. Mutu beton lantai jembatan = K-500
2. Kuat tekan beton $f_c' = 0,83 \times (500/10) = 41,5$ MPa

3.2. Analisis

Tinggi komponen beton prategang untuk bentang sederhana:

1. Pelat lantai: $h \geq L/30$
2. Box girder: $h \geq L/25$
3. Gelagar: $h \geq L/20$

Sedangkan untuk bentang menerus tinggi komponen dapat dikurangi 10%. Maka dari itu didapat tinggi *box girder* yang digunakan adalah sebagai berikut:

Syarat: $H \geq L/25$

$$60/25 = 2,4 \text{ meter.}$$

Akan tetapi digunakan *box girder* dengan $H = 2,8$ meter.

3.2.1. Tegangan Ijin Bahan

Tegangan yang terjadi pada setiap elemen jembatan tidak boleh melebihi dari tegangan ijin bahannya. Berikut adalah tegangan ijin bahannya:

1. Beton Prategang (f'_c) = 41,5 Mpa

- a. Pada saat *transfer*

$$f_{ci} = 80\% \times f'_c$$

$$f_{ci} = 80\% \times 41,5$$

$$f_{ci} = 33,2 \text{ Mpa}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$F_{cc} = 0,6 \times f_{ci}$$

$$F_{cc} = 0,6 \times 33,2$$

$$F_{cc} = 19,92 \text{ Mpa}$$

Tarik

$$F_{ct} = 0,25 \times \sqrt{f_{ci}}$$

$$F_{ct} = 0,25 \times \sqrt{33,2}$$

$$F_{ct} = 0,86 \text{ Mpa}$$

b. Pada saat *service*

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$F_{cc} = 0,45 \times f_c'$$

$$F_{cc} = 0,45 \times 41,5$$

$$F_{cc} = 18,68 \text{ Mpa}$$

Tarik

$$F_{ct} = 0,5 \times \sqrt{f_c'}$$

$$F_{ct} = 0,5 \times \sqrt{32,2}$$

$$F_{ct} = 2,8 \text{ Mpa}$$

Modulus Elastisitas

$$\begin{aligned} E_c &= w_c^{1,5} (0,043 \sqrt{f_c'}) \\ &= 2550^{1,5} (0,043 \sqrt{41,5}) \\ &= 35669,97 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

3.2.2. Baja Prategang

Peraturan-peraturan untuk baja prategang terdapat pada SNI T-12-2004 Pasal 4.4.3.

- a. Modulus *elastisitas* (E_s) = 200.000 Mpa
- b. Kabel prategang

3.2.3. Perencanaan Struktur Skunder

3.2.3.1. Perhitungan Tiang Sandaran

Berdasarkan pada peraturan perencanaan teknik jembatan yang mengacu pada RSNI T-02-2005 Pasal 12.5, beban yang bekerja pada tiang sandaran adalah berupa gaya horizontal sebesar 0,75 KN/m yang bekerja pada tiang sandaran setinggi 100 cm terhitung dari lantai trotoar. Tiang sandaran direncanakan untuk beban daya layan rencana sebesar.

$$W = W \times L$$

$$W = 0,75 \times 2$$

$$W = 1,5 \text{ kN}$$

Dimana:

L = jarak antara tiang sandaran

Tiang sandaran juga menerima beban angin sebesar:

$$H_w = 0,0006 \times C_w \times A_s \times (V_w)^2 \text{ [kN]}$$

Dimana:

H_w = Kecepatan angin rencana (m/dt)

C_w = Koefisien seret, dari Tabel RSNI T-02-2005

V_w = Kecepatan angin rencana (m/dt²), dari Tabel 28

A_s = Luas koefisien bagian samping jembatan (m²)

Panjang bentang jembatan = 300 m

Jarak tiang sandaran = 2 m

Bahan yang digunakan:

Mutu beton (f_c') = 41,5 Mpa

Mutu baja (f_y) = 240 Mpa

Pipa sandaran:

Diameter pipa (D) = 60 mm

Tebal pipa = 3 mm

Diameter dalam (d) = diameter pipa (D) – 2 (tebal pipa)

$$= 60 - 2 (3)$$

$$= 54 \text{ mm}$$

Beban angin yang diterima oleh tiang sandaran:

$$\frac{b}{d} = \frac{17000}{4000} = 4,25$$

Dimana:

d = tinggi *box girder* (struktur utama) + tinggi trotoar + tinggi sandaran

$$= 280 \text{ cm} + 20 \text{ cm} + 100 \text{ cm}$$

$$= 400 \text{ cm} = 4000 \text{ mm}$$

Keterangan:

b = lebar keseluruhan jembatan dihitung dari sisi luar jembatan

d = tinggi bangunan atas, termasuk tinggi bangunan sandaran masif

Nilai C_w diperoleh dengan menginterpolasi nilai $\frac{b}{d}$ yang terdapat pada Tabel 27 RSNI T-02-2005. Untuk nilai $\frac{b}{d}$ sebesar 4,25 maka diperoleh:

Nilai koefisien seret $C_w = 1,3$ (dari hasil interpolasi b/d)

Nilai $V_w = 30$ m/s, karena letak jembatan yang jauh dari pantai (asumsi)

Nilai $A_s =$ tinggi tiang sandaran x jarak antara tiang sandaran
 $= 1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$
 $= 2 \text{ m}^2$

Sehingga diperoleh nilai H_w sebesar:

$$\begin{aligned} H_w &= 0,0006 \times C_w \times (V_w)^2 \times A_s \\ &= 0,0006 \times 1,3 \times (30)^2 \times 2 \\ &= 1,4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Jadi, momen *ultimit* (M_u) yang dipikul oleh tiang sandaran:

$$\begin{aligned} M_u &= (\text{beban angin } H_w + \text{beban daya layan}) \times \text{tinggi tiang sandaran} \\ &= (1,4 + 1,3) \times 1 \\ &= 2,7 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$M_n = \frac{M_u}{\phi} = \frac{2,7}{0,8} = 3,375 \text{ kNm} = 3,37 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

3.2.3.2. Trotoar

Trotoar akan direncanakan dengan dimensi lebar 0,75 m dan tebal 20 cm dan diletakkan di atas lantai kendaraan dan terdapat di masing-masing jalur. Berdasarkan acuan pada RSNI T-02-2005 semua elemen dari trotoar atau jembatan penyeberangan yang langsung memikul pejalan kaki harus direncanakan untuk memikul beban nominal sebesar 5 kPa.

Data-data yang dibutuhkan untuk perhitungan:

Panjang bentang jembatan = 300 meter

Jumlah trotoar = 2 buah (kiri-kanan)

Lebar trotoar = 100 cm

Tebal trotoar = 20 cm

Luas areal yang dibebani pejalan kaki:

$$\begin{aligned} A &= \text{Lebar trotoar} \times \text{Panjang total jembatan} \\ &= 0,75 \text{ m} \times 300 \text{ m} \\ &= 225 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Berdasarkan pada peraturan RSNI T-02-2005 (Pasal 6.9, Gambar 10 Pembebanan untuk pejalan kaki) diperoleh:

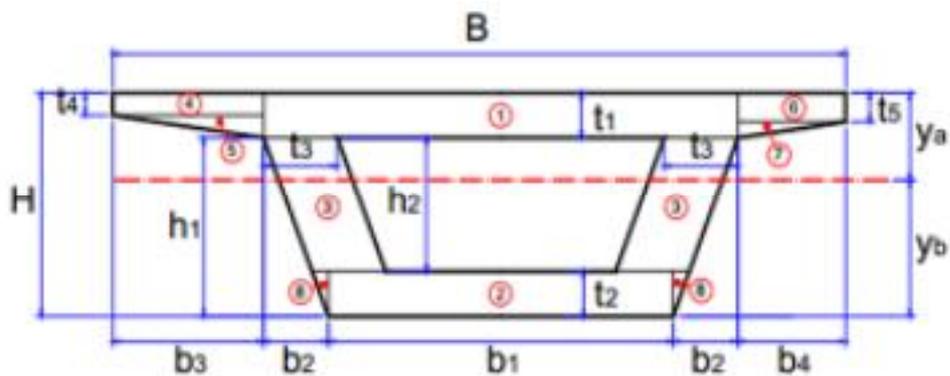
$A > 100 \text{ m}^2$, maka beban nominal sebesar 2 kPa.

Dari ketentuan diatas, maka untuk areal seluas 195 m^2 akan menghasilkan beban nominal pejalan kaki sebesar:

$$2 \text{ kPa} = 200 \text{ kg/m}^2 = \frac{200 \text{ kg/m}^2}{0,75 \text{ m}} = 266,67 \text{ kg/m}$$

Beban tersebut akan dibebankan pada beban utama jembatan.

Perhitungan *Section Properties Box Girder Prestress*.



Gambar L.12: Bagian *section properties* pada gelagar jembatan.

Tabel 3: Perhitungan *properties section box girder prestress*.

Section Properties	b (m)	H (m)	Bentuk	pias	Luas Tampang (m ²)	Y (m)	Statis Momen A*Y (m ³)	Ya	Yb	Inersia Momen (m ⁴)
1	5,5	0,65	persegi	1	3,58	2,475	8,85	1,66	0,84	2,52
2	3,88	0,65	persegi	1	2,52	0,325	0,82			4,56
3	0,85	1,5	persegi	2	2,55	1,4	3,57			0,41
4	1,75	0,4	persegi	1	0,70	2,6	1,82			0,63
5	1,75	0,25	segitiga	1	0,44	2,317	1,01			0,10
6	1,25	0,5	persegi	1	0,31	2,55	0,80			0,26
7	1,25	0,15	segitiga	1	0,09	2,25	0,21			0,02
8	0,24	0,65	segitiga	2	0,16	0,433	0,07			0,12
Total					10,35		17,15			8,61

Dimana:

b = lebar

h = tinggi

y = jarak titik berat pias ke serat atas

ya = jarak terhadap alas = $\frac{\sum A_i y_i}{\sum A_i}$

yb = H - Ya

Momen inersia = $[\frac{1}{36} \times b \times h^3] + [\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2]$ untuk bentuk segitiga

= $[\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2]$ untuk bentuk persegi

Analisa data:

$$1 = [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2]$$

$$= 2,52$$

$$2 = [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2]$$

$$= 4,56$$

$$3 = [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2]$$

$$= 0,41$$

$$4 = [\frac{1}{12} \times b \times h^3] + [A \times (y - ya)^2]$$

$$= 0,63$$

$$5 = [\frac{1}{36} \times b \times h^3] + [\frac{1}{2} \times A \times (y - ya)^2]$$

$$= 0,10$$

$$\begin{aligned}
6 &= \left[\frac{1}{12} \times b \times h^3 \right] + [A \times (y - y_a)^2] \\
&= 0,26 \\
7 &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - y_a)^2 \right] \\
&= 0,02 \\
8 &= \left[\frac{1}{36} \times b \times h^3 \right] + \left[\frac{1}{2} \times A \times (y - y_a)^2 \right] \\
&= 0,12
\end{aligned}$$

Hasil yang diperoleh:

$$\text{Jumlah luas penampang (A)} = 10,35 \text{ m}^2$$

$$\text{Jumlah statis momen (A*Y)} = 11,86 \text{ m}^3$$

$$\text{Jumlah inersia momen } I_o = 8,62 \text{ m}^4$$

Perhitungan Letak Titik Berat

$$\text{Tinggi } \textit{box girder prestress} (H) = 2,8 \text{ m}$$

$$\text{Luas penampang } \textit{box girder prestress} (A) = 10,35 \text{ m}^2$$

Letak titik berat:

$$Y_a = \frac{\sum A \cdot Y}{\sum A} = \frac{11,86}{10,35} = 1,15 \text{ m}$$

$$Y_b = H - Y_a = 2,8 - 1,15 = 1,35 \text{ m}$$

Perhitungan momen tahanan (modulus penampang)

$$\begin{aligned}
\text{Momen inersia terhadap alas balok: } I_b &= \sum A \times Y^2 + \sum I_o \\
&= 21,98 \text{ m}^4 + 8,62 \text{ m}^4 \\
&= 30,60 \text{ m}^4
\end{aligned}$$

Momen inersia terhadap titik berat balok:

$$\begin{aligned}
I_x &= I_b - A \times Y_b^2 \\
&= 30,60 \text{ m}^4 - (10,35 \text{ m}^2 \times 1,35) \\
&= 16,63 \text{ m}^4
\end{aligned}$$

Momen tahanan sisi atas:

$$W_a = \frac{I_x}{Y_a} = \frac{16,63}{1,15} = 14,46 \text{ m}^3$$

Momen tahanan sisi bawah:

$$W_b = \frac{I_x}{Y_b} = \frac{16,63}{1,35} = 12,3 \text{ m}^3$$

Berat beton *prestress* (W_c) = $2550 \text{ kg/m}^3 = 25,5 \text{ kN/m}^3$ (asumsi)

Berat sendiri *box girder prestress* = $A \times W_c = 10,35 \times 25,5 = 263,84 \text{ kN/m}$

Analisa Pembebanan

1. Aksi Tetap

a. Analisa Berat Sendiri

Berat beton *prestress* (W_c) = $2550 \text{ kg/m}^3 = 25,5 \text{ kN/m}^3$

Berat sendiri *box girder prestress* (P_{MS}) = $A \times W_c = 10,35 \times 25,5 = 263,9 \text{ kN/m}$

b. Analisa Beban Mati Tambahan

- Berat lapisan aspal (*surface*)

Tebal aspal x lebar lantai kendaraan x Bj. Aspal
= $0,05 \text{ m} \times 14 \text{ m} \times 2200 \text{ kg/m}^3$
= 1540 kg/m

- Berat trotoar

Tebal trotoar x lebar trotoar x Bj. Beton x jumlah
= $0,2 \text{ m} \times 0,75 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^2 \times 2$
= 720 kg/m

- Berat kerb

Tebal kerb x lebar kerb x Bj. Beton x jumlah
= $0,2 \text{ m} \times 0,25 \text{ m} \times 2400 \text{ kg/m}^2 \times 2$
= 240 kg/m

- Berat tiang sandaran dan penerangan (asumsi)

= 250 kg/m

- Berat air hujan (5 cm)

= $0,05 \text{ m} \times 17 \text{ m} \times 980 \text{ kg/m}^3$
= 833 kg/m

Total beban mati tambahan (P_{MA}) = $3583 \text{ kg/m} = 35,83 \text{ kN/m}$

2. Beban Lajur “D”

Untuk perhitungan kekuatan lantai kendaraan atau sistem lantai kendaraan jembatan harus digunakan beban “T”, yaitu beban yang merupakan kendaraan truk yang mempunyai beban roda ganda (*dual wheel load*) sebesar 10 ton.

d. Beban Terbagi Merata (BTR)

Untuk penyebaran gaya arah melintang $L = 60$ m

- Sepanjang 5 m:

$$q_{BTR_{50}} = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{60}\right) \times 5 \times 100\% = 13,5 \text{ kN/m}$$

- Sepanjang $(B - 1,5) - 5 \text{ m} = (8,5 - 1,5) - 5 = 2 \text{ m}$

$$q_{BTR_{50}} = 9,0 \times \left(0,5 + \frac{15}{60}\right) \times 2 \times 50\% = 4,75 \text{ kN/m}$$

Total beban terbagi merata yang bekerja sepanjang bentang 50 meter adalah:

$$q_{BTR_{total}} = 13,5 + 4,75 = 18,25 \text{ kN/m}$$

e. Beban Garis Terpusat (BGT)

Faktor beban dinamis untuk bentang 60 meter menurut Rumus 2.16 pada RSNI T-02-2005, yaitu:

$$\begin{aligned} FBD &= 0,4 - 0,0025 (L - 60) \\ &= 0,4 - 0,0025 (60 - 60) \\ &= 0,3975 \end{aligned}$$

- $L = 5$ meter

$$\begin{aligned} P_{TD} &= 49 \times (1 + FBD) \times \text{lebar lajur} \times 100\% \\ &= 49 \times (1 + 0,3975) \times 5 \times 100\% \\ &= 342,3875 \text{ kN} \end{aligned}$$

- $L = 2$ meter

$$\begin{aligned} P_{TD} &= 49 \times (1 + FBD) \times \text{lebar lajur} \times 50\% \\ &= 49 \times (1 + 0,3975) \times 2 \times 50\% \\ &= 68,4775 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \text{Total dari beban garis (BGT) yang diperoleh adalah} \\
& = P_{TD} 7 \text{ m} + P_{TD} 5 \text{ m} \\
& = 342,3875 \text{ kN} + 68,4775 \text{ kN} \\
& = 410,865 \text{ kN (terpusat ditengah bentang)}
\end{aligned}$$

f. Beban truk “T”

Beban truk “T” adalah sebesar 112,5 kN dengan faktor kejut FBD = 30% untuk bentang 150 m.

$$TU' = 112,5 \times (1 + FBD) \times \text{load faktor } (K_{TB}^U)$$

$$TU' = 112,5 \times (1 + 0,3) \times 1,8$$

$$TU' = 292 \text{ kN}$$

3. Analisa Beban Dari Aksi Lingkungan

a. Beban Angin

$$\begin{aligned}
Q_{EW} &= \left[\frac{1}{2} \times \frac{h}{x} \times T_{EW} \right] \times 2 \\
&= \left[\frac{1}{2} \times \frac{2}{1,75} \times 1,40 \right] \times 2 \\
&= 1,6 \text{ kN/m}
\end{aligned}$$

b. Beban Pejalan Kaki (TP)

$$2 \text{ kPa} = 200 \text{ kg/m}^2 = \frac{200 \text{ kg/m}}{0,75 \text{ m}} = 266,67 \text{ kg/m} = 2,67 \text{ KN/m}$$

c. Beban Gempa

$$\text{Berat sendiri } \textit{box girder prestress} (P_{MS}) = 263,9 \text{ kN/m}$$

$$\text{Beban mati tambahan } (P_{MA}) = 35,83 \text{ kN/m}$$

$$\text{Panjang bentang yang ditinjau } (L) = 60 \text{ m}$$

$$\begin{aligned}
W_T &= (P_{MS} + P_{MA}) \times L \\
&= (263,9 + 35,83) \times 60 \\
&= 17983,8 \text{ kN}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{EQ} &= 0,10 \times W_T \\
&= 0,10 \times 17983,8 \\
&= 1798,38 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Beban gempa vertikal:

$$Q_{EQ} = \frac{T_{eq}}{L} = \frac{1798,38}{60} = 29,97 \text{ kN/m}$$

Resume Pembebanan Yang Terjadi Pada *Box Girder*

1. Berat sendiri *box girder*

$$P_{MS} = 263,9 \text{ kN/m} = 26,39 \text{ T/m}$$

2. Beban mati tambahan

$$P_{MA} = 35,83 \text{ kN/m} = 3,583 \text{ T/m}$$

3. Beban Lajur "D"

• Beban Terbagi Rata (BTR)

$$q_{BTR} = 18,25 \text{ kN/m}$$

• Beban Garis Terpusat (BGT)

$$q_{BGT} = 410,865 \text{ kN/m}$$

4. Beban angin (T_{EW})

$$T_{EW} = 1,6 \text{ kN/m}$$

5. Beban pejalan kaki (TTP)

$$(T_{TP}) = 2,67 \text{ kN/}$$

6. Beban gempa (T_{EQ})

$$T_{EQ} = 29,97 \text{ kN/m}$$

Berikut adalah hasil serta gambar dari momen pembebanan dengan bantuan program SAP 2000 v.11:

1. Momen beban sendiri = 31345,026 kN/m
2. Momen beban mati tambahan = 5995,978 kN/m
3. Momen beban terbagi rata (BTR) = 3054,814 kN/m
4. Momen beban garis terpusat (BGT) = 13267,434 kN/m
5. Momen pejalan kaki = 2017,463 kN/m
6. Momen gaya angin = 2013,767 kN/m
7. Momen gaya gempa = 5344,67 kN/m

3.3. Gaya *Prestress*, Eksentrisitas Dan Jumlah Tendon

3.3.1. Gaya *Prestress*

Kondisi awal (saat transfer)

- Mutu beton ($f'c$) = 41,5 Mpa.

Kuat tekan beton pada saat transfer

$$f_{ci} = 80\% \times f'c$$

$$f_{ci} = 80\% \times 41,5$$

$$f_{ci} = 33,2 \text{ Mpa}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$f_{cc} = 0,6 \times f_{ci}$$

$$f_{cc} = 0,6 \times 33,2$$

$$f_{cc} = 19,92 \text{ Mpa}$$

Tarik

$$f_{ct} = 0,25 \times \sqrt{f_{ci}}$$

$$f_{ct} = 0,25 \times \sqrt{33,2}$$

$$f_{ct} = 1,44 \text{ Mpa}$$

Letak titik berat terhadap sisi bawah profil *box girder*, $Y_b = 1,35$ m. Direncanakan jarak titik berat tendon terhadap sisi bawah *box girder* adalah, $Z_o = 0,30$ m.

Eksentrisitas Tendon, $e_s = Y_b - Z_o = 1,35 - 0,30 = 1,05$ m

Tahanan momen sisi atas: $W_a = 14,46 \text{ m}^3$

Tahanan momen sisi bawah: $W_b = 12,3 \text{ m}^3$

M_T = momen maksimum pada seluruh bentang akibat beban sendiri
= 31345,026 kN/m = 31345,026 x 10⁶ Nm

- Tegangan pada Serat atas

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e x Y_t}{I} - \frac{M_t x Y_t}{I}$$

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o x e}{W_a} - \frac{M_t}{W_a}$$

$$1,44 = - \frac{F_o}{10,35 \times 10^6} + \frac{F_o \times 840}{14,46 \times 10^9} - \frac{31345,026 \times 10^6}{14,46 \times 10^9}$$

$$F_o = 21292500 \text{ N}$$

- Tegangan pada serat bawah

$$f_{cc} = \frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e}{Wb} - \frac{Mt}{Wb}$$

$$23,9 = \frac{F_o}{10,35 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1050}{12,3 \times 10^9} - \frac{31345,026 \times 10^6}{12,3 \times 10^9}$$

$$F_o = 145560500 \text{ N}$$

Gaya *jacking* yang menentukan adalah gaya F_o pada serat bawah (tekan) yaitu $F_o = 145560500 \text{ N} = 145560,5 \text{ kN}$.

Jumlah *strand* yang diperlukan n_s

$$n_s = \frac{F_o}{P_{bs}} = \frac{145560,5}{183,70} = 792 \text{ strand}$$

Jumlah kawat untai (*strand cable*) untuk tiap tendon adalah 30 dan 35 kawat untai tiap tendon.

Digunakan jumlah *strand* sebagai berikut:

$n_{t1} = 10$ tendon masing-masing 22 *strand*/tendon. Jumlah tendon $n_{s1} = 220 \text{ strands}$

$n_{t2} = 10$ tendon masing-masing 22 *strand*/tendon. Jumlah tendon $n_{s2} = 220 \text{ strands}$

$n_{t3} = 10$ tendon masing-masing 30 *strand*/tendon. Jumlah tendon $n_{s2} = 220 \text{ strands}$

$n_{t4} = 10$ tendon masing-masing 30 *strand*/tendon. Jumlah tendon $n_{s2} = 220 \text{ strands}$

Jumlah tendon $n_t = n_{t1} + n_{t2} + n_{t3} + n_{t4} = 10 + 10 + 10 + 10 = 40$ tendon

Jumlah strands $n_s = n_{s1} + n_{s2} + n_{s3} + n_{s4} = 220 + 220 + 220 + 220 = 880 \text{ strands}$

Beban satu *strands*:

$$P_{bs1} = \frac{F_o}{n_s} = \frac{145560,5}{880} = 165,4 \text{ kN}$$

Persentase tegangan yang timbul pada baja (% *jacking force*)

$$p_o = \frac{F_o}{n_t \times P_{bs}} = \frac{145560,5}{40 \times 183,70} = 19,8\% < 85\% \dots\dots\dots\text{Ok! (sesuai pasal}$$

4.4.3.2.2. RSNI-T-12-2004)

Gaya prestrees yang terjadi akibat *jacking*:

$$P_j = p_o \times n_s \times P_{bs1} = 0,198 \times 880 \times 165,4 = 28819,296 \text{ kN}$$

Kondisi akhir (saat service)

Diperkirakan kehilangan tegangan (*loss of prestress*) = 25%

Gaya prestress akhir setelah kehilangan tegangan (*loss of prestress*) sebesar 25%:

$$P_{\text{eff}} = (100\% - 25\%) \times P_j = 75\% \times 28819,296 = 21614,472 \text{ kN}$$

Tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur pada saat *service* menurut SNI T-12-2004 Pasal 4.4.1.2 adalah sebagai berikut:

Tekan

$$f_{cc} = 0,45 \times f'c$$

$$f_{cc} = 0,45 \times 41,5$$

$$f_{cc} = 18,68 \text{ MPa}$$

Tarik

$$f_{ct} = 0,5 \times \sqrt{f'c}$$

$$f_{ct} = 0,5 \times \sqrt{41,5}$$

$$f_{ct} = 3,22 \text{ Mpa}$$

Momen-momen yang terjadi akibat pembebanan (berdasarkan perhitungan momen dengan program SAP 2000 v. 11, detailnya terdapat pada lampiran).

1. Momen akibat berat sendiri

$$M_{MS} = 31345,026 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

1. Momen akibat beban mati tambahan

$$M_{MA} = 5995,978 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

2. Momen akibat beban lajur "D"

$$M_{TD} = 16322,248 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

- Tegangan di serat atas

$$f_{ct} = -\frac{F_o}{A} + \frac{F_o \times e}{Wa} - \frac{M(MS+MA)}{Wa} - \frac{MTD}{Wa}$$

$$3,22 = -\frac{F_o}{10,35 \times 10^6} + \frac{F_o \times 1050}{14,46 \times 10^9} - \frac{(31345,026 \times 10^6) + (5885,97 \times 10^6)}{14,46 \times 10^9} - \frac{16322,25 \times 10^6}{14,46 \times 10^9}$$

$$F_o = 40978800 \text{ N}$$

- Tegangan di serat bawah

$$f_{cc} = \frac{F_0}{A} + \frac{F_0 \times e}{Wb} - \frac{M(MS+MA)}{Wb} - \frac{MTD}{Wb}$$

$$18,86 = \frac{F_0}{10,35 \times 10^6} + \frac{F_0 \times 1050}{12,3 \times 10^9} - \frac{(31345,026 \times 10^6) + (5995,97 \times 10^6)}{12,3 \times 10^9} - \frac{16322,25 \times 10^6}{12,3 \times 10^9}$$

$$F_0 = 127557970 \text{ N}$$

Gaya yang menentukan adalah gaya F_0 yang terjadi pada serat bawah yaitu:

$$F_0 = 127557970 \text{ Newton} = 127557,97 \text{ kN.}$$

3.4. Analisa Kehilangan Gaya Prategang

Gaya prategang pada beton mengalami proses reduksi yang progresif (pengurangan secara berangsur-angsur) sejak gaya prategang awal diberikan, sehingga tahapan gaya prategang perlu ditentukan pada setiap tahanan pembebanan, yaitu dari tahapan transfer gaya prategang ke beton sampai ke berbagai tahapan prategang yang terjadi pada kondisi beban kerja hingga mencapai kondisi ultimit. Pada dasarnya nilai masing-masing kehilangan gaya prategang adalah kecil, tetapi apabila dijumlahkan dapat menyebabkan penurunan gaya *jacking* yang signifikan, yaitu 15% - 20%, sehingga kehilangan gaya prategang harus dipertimbangkan. Beberapa hal yang harus diperhatikan untuk meminimalkan kehilangan gaya prategang adalah:

1. Mutu beton yang digunakan, minimal 40 MPa untuk memperkecil rangkak.
2. Tendon yang digunakan adalah mutu tinggi yang memiliki relaksasi rendah.

Secara umum, reduksi gaya prategang dapat dikelompokkan menjadi dua kategori, yaitu:

1. Kehilangan elastis langsung (segera) yang terjadi pada saat proses pabrikan atau konstruksi, termasuk perpendekan (deformasi) beton secara elastis, kehilangan karena pengakuran dan kehilangan karena gesekan.
2. Kehilangan yang bergantung pada waktu, seperti rangkak, susut dan kehilangan akibat efek temperatur dan relaksasi baja, yang semuanya dapat ditentukan pada kondisi limit tegangan akibat beban kerja di dalam beton prategang.

3.4.1. Perhitungan Kehilangan gaya Prategang Langsung

3.4.1.1. Kehilangan gaya prategang akibat perpendekan beton secara elastis (ES).

Pada struktur yang menggunakan kabel tunggal, tidak ada kehilangan gaya prategang akibat perpendekan beton, karena gaya pada kabel diukur setelah perpendekan terjadi. Pada penampang yang menggunakan lebih dari satu kabel, kehilangan gaya prategang ditentukan oleh kabel yang pertama ditarik dan memakai harga setengahnya untuk mendapatkan rata-rata semua kabel. Kehilangan gaya prategang pada struktur pasca tarik dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$ES = \Delta f_c = \frac{n P_i}{A_c}$$

Dimana:

f_c = tegangan pada penampang

P_i = gaya prategang awal

$$f_c = \frac{P_{bs}}{A_{st}} = \frac{183,70 \times 10^3}{100} = 1837 \text{ Mpa}$$

$$ES_1 = \frac{880 \times 183,70 \times 10^3}{10,35 \times 10^6} = 15,6 \text{ Mpa}$$

Kehilangan rata-rata gaya prategang:

$$ES = 0,5 \times ES_1 = 0,5 \times 15,6 = 7,8 \text{ Mpa}$$

Sehingga persentase kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis adalah:

$$\% ES = \frac{7,8}{1860} \times 100\% = 0,42\%$$

3.4.1.2. Kehilangan gaya prategang akibat gesekan pada tendon (Ps)

Berdasarkan SNI 03-2847-2002, kehilangan gaya prategang akibat friksi pada tendon pasca tarik dapat dihitung dengan rumus:

$$P_s = P_o^{(K L_x + \mu \alpha)}$$

Dimana:

P_o = Gaya *prestress* yang terjadi akibat gaya *jacking* = 28819,296 kN

K = Koefisien Wooble

$$= 0,0020 \text{ (Tabel 14 pasal 20.6 SNI 03-2847-2002)}$$

L_x = Panjang kabel yang ditinjau = 60 m

μ = Koefisien friksi = 0,20 (Tabel 14 pasal 20.6 SNI 03-2847-2002)

α = Perubahan sudut akibat pengaruh kelengkungan

$$= \frac{8y}{x} \text{ rad} = \frac{8 \times 1,050}{60} = 0,14 \text{ rad}$$

Maka, $K L_x + \mu \alpha = 0,0020 \times 60 + 0,20 \times 0,14 = 0,148 < 0,3$

Sehingga didapat,

$$P_s = P_o^{(1 + K L_x + \mu \alpha)} = 28819,296^{(1 + 0,148)} = 131793,65 \text{ kN}$$

Maka, kehilangan tegangan yang terjadi adalah:

$$\begin{aligned} \% \text{ loss} &= \frac{P_s - P_o}{P_o} \times 100\% \\ &= \frac{131793,65 - 28819,296}{28819,296} \times 100\% \\ &= 5,43 \% \end{aligned}$$

$$\Delta f_{ps} = \% \text{ loss} \times \text{teg. } \textit{Ultimit strand} = 5,43\% \times 1860 = 66,4 \text{ Mpa}$$

3.4.1.3. Kehilangan gaya prategang akibat slip pada angkur (ANC)

Kehilangan gaya prategang ini terjadi pada saat transfer gaya pendongkrak ke angkur. Tarikan mesin pendongkrak akan mendorong baji masuk kedalam konus dan setelah *jacking* dilepas, kabel akan menarik baji lebih rapat kedalam konus. Panjang atau besar slip tergantung pada tipe baji dan tegangan pada kawat tendon. Harga rata-rata panjang slip akibat pengangkuran adalah 2,5 mm, dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$ANC = \Delta L = \frac{f_c}{E_s} \times L$$

Dimana:

f_c = tegangan pada penampang = 1860 Mpa

E_s = modulus elastisitas baja tendon = 200.000 Mpa

$$\Delta L = \frac{f_c}{E_s} \times L = \frac{1860}{200000} \times 60000 = 558 \text{ mm}$$

Dengan rata-rata tiap slip 2,5 mm, maka persentase kehilangan gaya prategang akibat slip ankur adalah:

$$ANC = \frac{2,5}{558} \times 100\% = 0,45 \%$$

Maka, besarnya kehilangan prategang yang terjadi adalah

$$\Delta f_{ANC} = 0,45\% \times 1860 = 8,18 \text{ Mpa}$$

3.4.2. Kehilangan Gaya Prategang Berdasarkan Fungsi Waktu

3.4.2.1. Kehilangan gaya prategang akibat rangkai beton (CR)

Prategang yang terus menerus pada beton suatu batang prategang dapat mengakibatkan rangkai pada beton yang secara efektif mengurangi tegangan pada baja bermutu tinggi. Kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkai dapat ditentukan dengan dua cara, yaitu cara regangan rangkai batas dan cara koefisien rangkai. Dengan koefisien rangkai, besarnya kehilangan tegangan pada baja prategang akibat rangkai dapat ditentukan dengan mengacu pada rumus seperti berikut:

$$CR = K_{CR} \frac{E_s}{E_c} (f_{ci} - f_{cd})$$

Dimana:

K_{cr} = Koefisien rangkai = 2,0 untuk pratarik dan 1,6 untuk pasca tarik

E_c = Modulus elastisitas beton saat umur beton 28 hari

E_s = Modulus elastisitas baja prategang

f_{cs} = Tegangan pada beton pada level pusat baja segera setelah transfer

f_{cd} = Tegangan pada beton akibat beban mati tambahan setelah prategang diberikan

n = Rasio modulus (E_s/E_c)

E_c = 35669,97 Mpa

E_s = 200000 Mpa

$$f_{ci} = - \frac{Pi}{Ac} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{MDe}{Ic}$$

A_c = $10,35 \times 10^6 \text{ mm}^2$

I_c = $8,62 \times 10^{12} \text{ mm}^4$

E = 1050 mm

$$r^2 = \frac{Ic}{Ac} = \frac{8,62 \times 10^{12}}{10,35 \times 10^6} = 0,82 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$M_D = \text{Momen akibat beban sendiri} = 31345,026 \text{ kN} = 31345,026 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

$$P_i = 0,75 \times f_{pu} \times A_{ps} = 0,75 \times 1860 \times 13200 = 18414000 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} f_{ci} &= -\frac{P_i}{Ac} \left(1 + \frac{e^2}{r^2}\right) + \frac{MDe}{Ic} \\ &= -\frac{18414000}{10,35 \times 10^6} \left(1 + \frac{1050^2}{(0,82 \times 10^6)^2}\right) + \frac{(31345,026 \times 10^6) \times 1050}{8,62 \times 10^{12}} \\ &= 7,86 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$M_{MA} = \text{Momen akibat beban mati tambahan} = 5995,978 \text{ kN} = 5995,978 \times 10^6 \text{ Nmm}$$

$$f_{cd} = \frac{MMA \cdot e}{Ic} = \frac{5995,978 \times 10^6 \times 1050}{8,62 \times 10^{12}} = 0,73 \text{ Mpa}$$

$$\begin{aligned} CR &= K_{CR} \frac{Es}{Ec} (f_{ci} - f_{cd}) \\ &= 1,6 \frac{200000}{35669,97} (7,86 - 0,73) = 104,53 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{CR}{f_c} \times 100\% = \frac{104,53}{1860} \times 100\% = 5,62 \%$$

3.4.2.2. Kehilangan gaya prategang akibat beban susut beton (SH)

Seperti halnya pada rangkai beton, besarnya susut pada beton dipengaruhi oleh beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut meliputi proporsi campuran, tipe agregat, tipe semen, tipe perawatan, waktu antara akhir perawatan eksternal dan pemberian prategang, ukuran komponen struktur dan kondisi lingkungan.

Untuk komponen struktur pasca tarik, kehilangan prategang akibat susut agak lebih kecil karena sebagian susut telah terjadi sebelum pemberian pasca tarik. Besarnya kehilangan prategang akibat susut pada beton dapat dihitung dengan rumus:

$$SH = \varepsilon_{CS} E_s$$

Dimana:

$$E_s = \text{modulus elastisitas baja prategang} = 200.000 \text{ Mpa}$$

$$\varepsilon_{CS} = \text{regangan susut sisa total dengan harga:}$$

$$\varepsilon_{CS} = 300 \times 10^{-6} \text{ untuk struktur pratarik}$$

$\epsilon_{CS} = \frac{200 \times 10^{-6}}{\log(t+2)}$ untuk struktur pasca tarik, dengan t adalah usia beton pada waktu transfer prategang dalam hari

$$\epsilon_{CS} = \frac{200 \times 10^{-6}}{\log(7+2)} = 0,0002096$$

$$\begin{aligned} SH &= \epsilon_{CS} E_s \\ &= 0,0002096 \times 200000 \\ &= 41,92 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{41,92}{1860} \times 100\% = 2,5\%$$

3.4.2.3. Kehilangan gaya prategang akibat relaksasi baja (RE)

Akibat perpendekan elastis (kehilangan gaya prategang seketika setelah peralihan) dan gaya prategang yang tergantung waktu, CR dan SH ada pengurangan berkelanjutan pada tegangan beton, jadi kehilangan gaya prategang akibat relaksasi berkurang. Sebenarnya balok prategang mengalami perubahan regangan baja yang konstan di dalam tendon bila terjadi rangkai yang tergantung pada nilai waktu. Oleh karena itu, ACI memberikan perumusan untuk kehilangan gaya prategang dimana nilai dari K_{RE} , J dan C tergantung dari jenis dan tipe tendon, dimana untuk *strand* atau kawat *stress* yang dipakai adalah *relieved* derajat 1.745 Mpa. Adapun perumusan tersebut yaitu:

$$RE = C \{K_{RE} - J (SH + CR + ES)\}$$

Dimana:

K_{RE} = koefisien relaksasi = 138 Mpa (Tabel 4-5 T.Y.Lin, hal 90)

J = faktor waktu = 0,1 (Tabel 4-5 T.Y.Lin, hal 90)

C = faktor relaksasi = 1 (Tabel 4-5 T.Y.Lin)

SH = kehilangan tegangan akibat susut

CR = kehilangan tegangan akibat rangkai

ES = kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis

$$\begin{aligned} RE &= C \{K_{RE} - J (SH + CR + ES)\} \\ &= 1 \{138 - 0,1 (41,92 + 104,53 + 7,8)\} \\ &= 126,632 \text{ Mpa} \end{aligned}$$

$$\% \text{ loss} = \frac{126,632}{1860} \times 100\% = 6,8 \%$$

Resume kehilangan tegangan yang terjadi adalah:

1. Kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis (ES) = 0,42%
2. Kehilangan tegangan akibat gesekan tendon (Ps) = 3,57%
3. Kehilangan tegangan akibat slip ankur (ANC) = 0,45%
4. Kehilangan tegangan akibat rangkai beton (CR) = 5,62%
5. Kehilangan tegangan akibat susut beton (SH) = 2,5%
6. Kehilangan tegangan akibat relaksasi baja (RE) = 6,8%

Persentase kehilangan gaya prategang keseluruhan adalah:

$$\begin{aligned}\Delta f_{pT} &= ES + Ps + ANC + CR + SH + RE \\ &= 0,42\% + 3,57\% + 0,45\% + 5,62\% + 2,5\% + 6,8\% \\ &= 21,22\%\end{aligned}$$

Pada perencanaan awal, kehilangan tegangan pada beton prategang sebesar 25%. Sehingga hasil dari estimasi perencanaan kehilangan tegangan yang telah di analisa yaitu:

21,22% < 25% (maka perencanaan ini dinyatakan OK!)

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA DIRI PENULIS

Nama lengkap : Muhammad Rezki
Panggilan : Rezki
Tempat, Tanggal Lahir : Tg. Alam, 06 Februari 1995
Jenis Kelamin : Laki-laki
Alamat : Tg. Alam Dusun 7, Kisaran
Nomor KTP : 1209130602950001
Alamat KTP : Tg. Alam
No. Telp Rumah : -
No. HP/Telp Seluler : 083197267882
E-mail : muhammadrezki335@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

Nomor Induk Mahasiswa : 13072100709
Fakultas : Teknik
Jurusan : Teknik Sipil
Program Studi : Teknik Sipil
Perguruan Tinggi : Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
Alamat Perguruan Tinggi : Jl. Mughtar Basri BA. No. 3 Medan 20238

No	Tingkat Pendidikan	Nama dan Tempat	Tahun Kelulusan
1	Sekolah Dasar	SDN 018446 Tg. Alam	2007
2	MTs	MTs Negeri Kisaran	2010
3	SMK	SMK Muhammadiyah 10 Kisaran	2013
4	Melanjutkan Kuliah Di Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Tahun 2013 sampai selesai.		

ANALISA JEMBATAN BOX GIRDER PRESTRESS

Ade Faisal¹, Muhammad Rezki^{1,2}, Tondi Amirsyah Putra Pulungan¹

¹Program Studi Teknik Sipil
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan

²Email: muhammadrezki226@gmail.com

Abstrak. Dewasa ini perkembangan pengetahuan tentang perencanaan suatu bangunan berkembang semakin luas, termasuk salah satunya pada perencanaan pembangunan sebuah jembatan yang berkembang luas sejalan dengan kemajuan peradaban manusia. Jembatan merupakan suatu struktur konstruksi yang memungkinkan route transportasi melalui sungai, danau, kali, jalan raya, jalan kereta api dan lain-lain. Dengan seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, jembatan mulai berkembang dari yang dahulunya hanya dibuat dengan kayu sekarang telah berubah menggunakan material beton ataupun baja. Kemudian seiring berkembangnya teknologi tentang beton, mulailah orang membuat jembatan dengan teknologi beton prategang. Dalam tugas akhir ini akan direncanakan jembatan menggunakan profil *box girder* dengan bentang 150 m dengan lebar 17 meter. Tujuan dari tugas akhir ini adalah untuk mengetahui nilai kehilangan gaya prategang yang terjadi pada gelagar jembatan. Perencanaan ini berdasarkan pada peraturan-peraturan Standar Nasional Indonesia (SNI) yang berlaku. Analisa struktur akan dijalankan dengan bantuan program SAP 2000 v.11. Pada kesimpulan di tugas akhir ini bahwasanya nilai kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *box girder type single cellular* adalah 14,166 %, sedangkan pada *box girder type twin cellular* adalah 16,106 %.

Kata kunci: Jembatan, *box girder*, *prestress*, *tendon*, *pembebanan*.

Abstract. Today the development of knowledge about the planning of a building is growing more widely, including one of them in planning the construction of a bridge that developed widely in line with the progress of human civilization. The bridge is a construction structure that allows the route of transportation through rivers, lakes, times, highways, railroads and others. With the development of science and technology, the bridge began to develop from the former only made with wood has now been changed using concrete or steel material. Then as the technology develops about concrete, people start to build bridges with prestressed concrete technology. In this final project will be planned bridge using girder box profile with span 150 m with width 17 meter. The purpose of this final task is to know the value of loss of prestressing style that occurs on the bridge girder. This planning is based on the applicable Indonesian National Standard (SNI) regulations. Analysis of the structure will be run with the help of SAP 2000 v.11 program. At the conclusion in this final task that the value of losing prestressing that occurs in the box type girder single cellular is 14.166%, while the box girder type twin cellular is 16.106%.

Keywords: Bridge, *box girder*, *prestress*, *tendon*, *loading*.

1. PENDAHULUAN

Transportasi merupakan sarana yang digunakan oleh manusia dalam melakukan berbagai interaksi sesama manusia sebagaimana halnya makhluk sosial. Interaksi tersebut dapat berupa interaksi sosial, ekonomi, politik, maupun budaya. Oleh karena itu transportasi tidak boleh dipandang sebelah mata, karena hal tersebut sangat berpengaruh sekali pada kehidupan sekelompok orang tertentu di daerah tertentu. Mengingat

pentingnya sarana transportasi dalam kehidupan manusia, maka diperlukan sarana transportasi yang baik diantaranya adalah jalan dan jembatan.

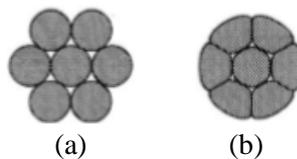
Salah satu sarana transportasi yang dibutuhkan untuk data melakukan interaksi dengan lancar adalah jembatan. Oleh karena itu pembangunan jembatan butuh di lakukan analisa yang tepat, saat ini struktur jembatan *box girder* yang menjadi pilihan utama untuk membangun jembatan modern dan dapat menekan biaya pembuatannya. Misalnya dalam merencanakan struktur box girder dengan panjang bentang 150 meter dan lebar 17 meter, yang dalam konstruksinya girder-girder tersebut dicetak secara segmental di pabrik *precast*.

1.1. Desain Beton

Menurut ACI, beton yang boleh mengalami prategang adalah beton yang telah berumur 28 hari dengan kuat tekan beton telah mencapai 30 sampai 40 MPa.

1.2. Desain Baja

Baja yang digunakan sebagai tulangan prategang merupakan jenis *uncoated stress relieve seven wire strand low relaxation*. Baja *strand* merupakan jenis yang paling banyak digunakan untuk penegangan *post-tension*. *Strand* yang digunakan pada proyek ini sesuai spesifikasi ASTM A-416.



Gambar 1: Strand prategang 7 kawat, (a) Standard dan (b) yang dipadatkan.

2. STUDI PUSTAKA

2.1. Jembatan

Jembatan juga merupakan suatu bangunan pelengkap prasarana lalu lintas darat dengan konstruksi terdiri dari pondasi, struktur bangunan bawah dan struktur bangunan atas, yang menghubungkan dua ujung jalan yang terputus akibat bentuk rintangan melalui konstruksi struktur bangunan atas.

2.2. Pembebanan Pada Jembatan

Pembebanan berdasarkan pada muatan dan aksi- aksi yang terjadi pada jembatan berdasarkan peraturan yang ada dalam RSNI T-02-2005.

Aksi-aksi (beban, perpindahan dan pengaruh lainnya) dikelompokkan menurut sumbernya kedalam beberapa kelompok, yaitu:

- Aksi tetap.
- Aksi lalu-lintas.
- Aksi lingkungan (angin, hujan, gempa, dsb).
- Aksi-aksi lainnya.

Berdasarkan lamanya bekerja, aksi dibedakan menjadi 2, yaitu:

1. Aksi tetap: aksi yang bekerja sepanjang waktu atau pada jangka waktu yang lama.
2. Aksi transient: aksi yang bekerja dalam jangka waktu yang pendek.

2.2.1. Aksi Tetap

a. Beban mati

Beban mati yang terjadi pada struktur ada 2 macam, yaitu berat sendiri dan beban mati tambahan. Beban sendiri jembatan adalah semua beban tetap yang berasal dari berat sendiri jembatan yang ditinjau, termasuk segala unsure tambahan yang dianggap merupakan suatu kesatuan tetap dengannya yang terdiri dari berat masing-masing bagian struktural dan elemen-elemen non-struktural.

b. Pengaruh penyusutan dan rangkak

Pengaruh rangkak dan penyusutan harus diperhitungkan dalam perencanaan jembatan-jembatan beton. Pengaruh ini harus dihitung dengan menggunakan beban mati dari jembatan.

c. Pengaruh prategang

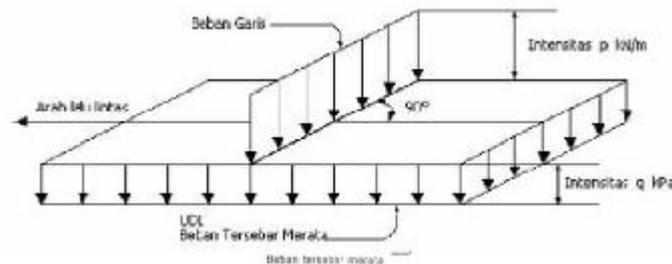
Prategang akan menyebabkan pengaruh sekunder pada komponen yang terkekang pada bangunan statis tak tentu. Pengaruh sekunder tersebut harus diperhitungkan baik pada batas daya layan ataupun batas ultimate.

2.2.2. Aksi Lalu-Lintas

Lajur lalu lintas rencana harus mempunyai lebar 2,75 m. Jumlah maksimum lajur yang digunakan untuk berbagai lebar jembatan bisa dilihat dalam Tabel 2.1. Lajur lalu lintas rencana harus disusun sejajar dengan sumbu memanjang jembatan.

1. Beban lajur "D"

Beban lajur "D" terdiri dari beban tersebar merata (BTR) yang digabung dengan beban garis (BGT) seperti yang terlihat dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1: Beban Lajur "D" (RSN T-02-2005).

- Beban Terbagi Rata (BTR)

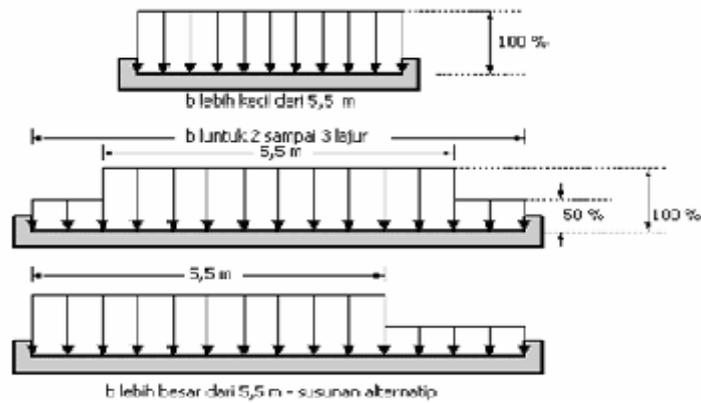
Mempunyai intensitas q kPa, dimana besarnya q tergantung pada panjang total yang dibebani L seperti berikut:

$$L \leq 30 \text{ m: } q = 9,0 \text{ kPa} \quad (2.1)$$

$$L > 30 \text{ m: } q = 8,0 \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) \text{ kPa} \quad (2.2)$$

- Beban Garis (BGT)

Dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap lalu lintas jembatan. Besar intensitas $p = 49$ kN/m. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum jembatan menerus, BGT kedua identik harus ditempatkan pada posisi dalam dengan arah melintang jembatan pada bentang lainnya.



Gambar 2.2: Penyebaran Pembebanan Pada Arah Melintang (RSNI T-02-2005).

2. Faktor beban dinamis

Untuk bentang menerus panjang bentang ekivalen L_E diberikan dengan rumus:

$$L_E = \sqrt{L_{AV}} \times L_{max} \quad (2.3)$$

Faktor beban dinamis untuk BGT pada beban lajur "D" tergantung pada panjang bentang, sebagai berikut:

$$- \text{Bentang } (L) < 50 \text{ m; FBD} = 0,4 \quad (2.4)$$

$$- 50 \leq \text{bentang } (L) \leq 90 \text{ m; FBD} = 0,525 - 0,0025 L \quad (2.5)$$

$$- \text{Bentang } (L) > 90 \text{ m; FBD} = 0,3 \quad (2.6)$$

Faktor beban dinamis untuk beban truk "T", FBD diambil 0,3.

2.2.3. Aksi Lingkungan

1. Beban angin

Apabila suatu kendaraan sedang berada di atas jembatan, beban garis merata tambahan arah horizontal harus diterapkan pada permukaan lantai seperti diberikan dengan rumus:

$$T_{ew} = 0,0012 \times C_w \times (V_w)^2 \quad [\text{kN}] \quad (2.7)$$

Tabel 2.1: Kecepatan angin rencana.

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

Tabel 2.2: Koefisien seret C_w .

Tipe jembatan	C_w
$b/d = 1,0$	2,1
$b/d = 1,0$	1,5
$b/d = 1,0$	1,25
Bangunan atas rangka	1,2

2. Beban gempa

$$g = 9,8 \text{ m/d}^2 \quad (2.8)$$

Gaya gempa vertikal rencana

$$T_{EQ} = 0,10 \times W_T \quad (2.9)$$

$$T_{EQ} - K_H/W_T \quad (2.10)$$

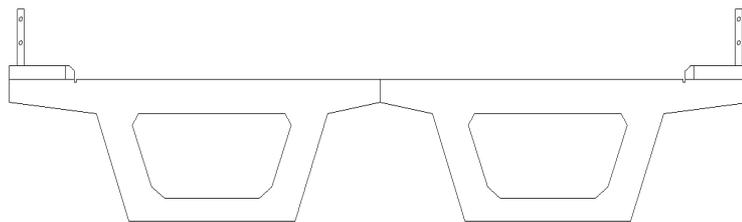
3. Koefisien geser dasar (C)

$$T = 2 \square \sqrt{\frac{Wtp}{g - Kp}} \quad (2.11)$$

3. METODOLOGI

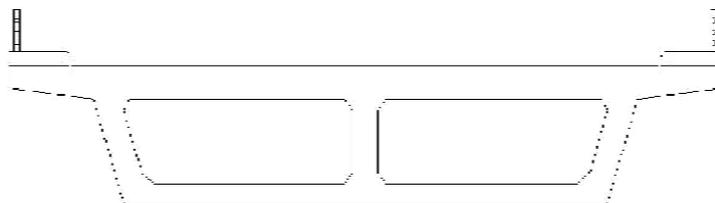
Metode perencanaan jembatan berdasarkan kriteria serta perhitungan gaya-gaya yang bekerja di dalamnya berdasarkan acuan pada peraturan RSNI T-02-2005 untuk mendapatkan faktor nilai keamanan serta efisiensi dalam perencanaan jembatan. Sebagaimana telah dijelaskan pada bab sebelumnya, perencanaan jembatan ini hanya difokuskan kepada perhitungan struktur atasnya saja. Jenis jembatan yang direncanakan menggunakan beton prategang serta *Profil Single Cellular* dan *Twin Cellular Box Girder*.

a. *Type Single Cellular*



Gambar 3.1: Penampang Box Girder Type Single Cellular.

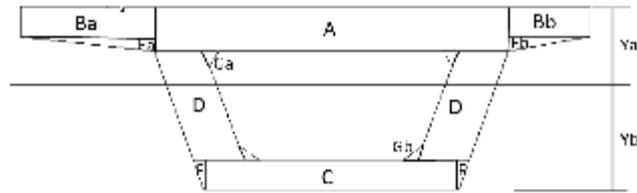
b. *Type Twin/Multi cellular*



Gambar 3.2: Penampang Box Girder Type Twin/Multi Cellular.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Perencanaan



Gambar 4.1: Bagian section properties pada gelagar jembatan.

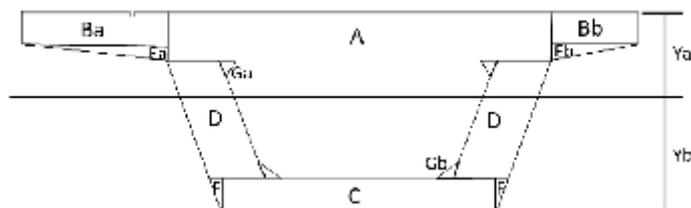
Konstruksi jembatan yang direncanakan adalah konstruksi jembatan *box girder prestressed* dengan data-data sebagai berikut:

Panjang total	: 150 meter, terdiri dari 3 bentang
Panjang bentang	: 50 m
Tipe <i>Box Girder Prestressed</i>	: <i>single cellular</i> dan <i>twin cellular</i>
Lebar total	: 17 meter
Lebar perkerasan jalan	: 14 meter
Lebar trotoar	: 2 x 1,5 meter
Jumlah lajur	: 4 x 3,5 meter
Jumlah jalur	: 2 x 7 meter

4.2. Data Bahan

- Kuat tekan beton prategang (f_c'): 49,8 MPa.
- Kuat tekan beton untuk struktur sekunder (f_c'): 30 Mpa.
- Mutu baja yang digunakan untuk penulangan *box girder* adalah baja mutu (f_y): 400 Mpa.
- Mutu baja yang digunakan untuk penulangan struktur sekunder adalah baja mutu (f_y): 240 Mpa.
- Jenis *strand*: *Uncoated 7 wire super strand* ASTM A-416 grade 270.
- Beban putus nominal satu *strand* (f_{py}): 260,7 kN.
- Diameter nominal *strand* (d): 140 mm².
- Diameter selubung tandon: 15,2 mm.

4.3. Analisa Penampang



Gambar 4.2: Bagian section properties pada gelagar jembatan.

Tabel 4.1: Perhitungan momen inersia *properties section box girder prestress*.

Section Properties	b (m)	H (m)	Bentuk	Pias	Luas Tampang (m ²)	Y (m)	Statis Momen A*Y (m ³)	Ya	Yb	Inersia Momen (m ⁴)
A	5,3	0,6	Persegi	1	3,18	0,3	0,954	0,91	1,59	1,28
Ba	2	0,4	Persegi	1	0,80	0,2	0,16			0,41
Bb	1,2	0,4	Persegi	1	0,48	0,2	0,10			0,25
C	3,8	0,4	Persegi	1	1,52	2,3	2,76			2,96
D	0,6	1,5	Persegi	2	1,80	1,35	2,43			0,52
Ea	2	0,2	Segitiga	1	0,20	0,5	0,1			0,02
Eb	1,2	0,2	Segitiga	1	0,12	0,5	0,06			0,03
F	0,2	0,4	Segitiga	2	0,08	1,35	0,108			0,02
Ga	0,2	0,2	Segitiga	2	0,04	0,7	0,028			0,002
Gb	0,2	0,2	Segitiga	2	0,04	2	0,08			0,02
Nilai total					8,26		7,51			5,54

4.4. Gaya prestress, Eksentrisitas dan Jumlah tendon

a. Kondisi awal (saat *transfer*)

Gaya prategang awal, $P_t = 84354,45$ kN

Beban putus *strand* total, $P_{bs1} = 239,6$ kN

Besar *Ultimate Tensile Strength* (UTS) = 75%

Jumlah *strand* yang diperlukan, $n_s = 352$ *strand*

Jumlah tendon yang diperlukan, $n_t = 16$ tendon

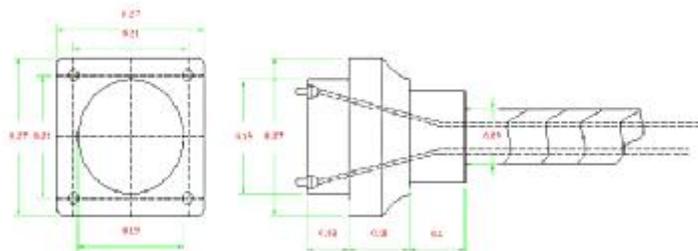
b. Kondisi akhir (saat *service*)

Gaya prestress akhir setelah kehilangan tegangan (*long of prestress*) sebesar 25%:

$P_{eff} = 12792,03$ kN

4.5. Penulangan *box girder*

a. Perencanaan jumlah *bursting steel* internal tendon



Gambar 4.3: Detail bursting steel internal tendon.

b. Penulangan pada segmen *box girder*

- Plat dinding tepi
Tebal plat dinding (t_d) = 600 mm
Diameter tulangan (D) = 22 mm
Jarak tulangan yang diperlukan (s) = 100 mm

- Plat bawah
Tebal plat dinding (t_3) = 400 mm
Diameter tulangan (D) = 22 mm
Jarak tulangan yang diperlukan (s) = 200 mm
- Plat atas
Tebal plat dinding (t_1) = 600 mm
Diameter tulangan (D) = 22 mm
Jarak tulangan yang diperlukan (s) = 200 mm

5. KESIMPULAN

5.1. *Box Girder Type Single Cellular*

1. Untuk tendon prategang pada desain satu *box girder* digunakan 16 tendon dengan spesifikasi diameter nominal *strands* 15,2 mm berjumlah 22 kawat jenis *uncoated 7 wire super strands* ASTM A-416-06 grade 270 setiap tendon.
2. Gaya prategang awal 84354,45 kN, mengalami kehilangan prategang sebesar 14,336% sehingga tersisa tegangan efektif 72261,4 kN dari prategang akibat *jacking force* sebesar 17056,04 kN. Digunakan tegangan efektif sebesar 75%, sebesar 12792,03 kN dari gaya prategang akibat *jacking force* 100% UTS yaitu 84339,2 kN.
3. Tegangan ijin tekan beton sebesar 22410 kPa, dan tegangan ijin tarik seton sebesar 11157,95 kPa.

5.2. *Box Girder Type Twin Cellular*

1. Untuk tendon prategang pada desain satu *box girder* digunakan 24 tendon yang masing-masing terdiri atas:
 - a. 16 tendon dengan spesifikasi diameter nominal *strands* 15,2 mm berjumlah 30 kawat jenis *uncoated 7 wire super strands* ASTM A-416-06 grade 270 setiap tendon.
 - b. 6 tendon dengan spesifikasi diameter nominal *strands* 15,2 mm berjumlah 35 kawat jenis *uncoated 7 wire super strands* ASTM A-416-06 grade 270 setiap tendon.
2. Gaya prategang awal 177860,5 kN, mengalami kehilangan prategang sebesar 16,606% sehingga tersisa tegangan efektif 148324,98 kN dari prategang akibat *jacking force* sebesar 50567,93 kN. Digunakan tegangan efektif sebesar 75%, sebesar 37925,96 kN dari gaya prategang akibat *jacking force* 100% UTS yaitu 177868,2 kN.
3. Tegangan ijin tekan beton sebesar 22410 kPa, dan tegangan ijin tarik seton sebesar 11157,95 kPa.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Budiadi, Andri. *Desain Praktis Beton Prategang*. Yogyakarta: Andi 2018.
- Fadlyn A.K. (2014). Perencanaan Flyover Menggunakan Profil Box Girder Dengan Metode Analisis Numeris. *Laporan Tugas Akhir*. Medan: Program Studi Teknik Sipil, Universitas Sumatera Utara.
- Lin, T.Y dan Burns, N.H. *Desain Struktur Beton Prategang* Jilid I Edisi III: Erlangga. 1993.
- Nawy, EG. *Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar* Jilid I Edisi III: Erlangga. 2001.
- Raju, K.N. *Beton Prategang*: Erlangga. 1998.

Standar Nasional Indonesia. *Standar Pembebanan Untuk Jembatan* RSNI T-02-2005.
Standar Nasional Indonesia. *Tata cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung* (SNI-3-2847-2002). Bandung. Desember 2002.
Supriyadi, Bambang dan Setyo Muntohar. *Jembatan*. 2000.