

**ANALISA STRUKTUR BOX GIRDER
JALAN LAYANG KERETA API KUALANAMU**

SKRIPSI

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Universitas Medan Area**

**MUHAMMAD RIDWAN
128110024**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN**

2017

LEMBAR PENGESAHAN
ANALISA STRUKTUR BOX GIRDER

JALAN LAYANG KERETA API KUALANAMU

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Universitas Medan Area

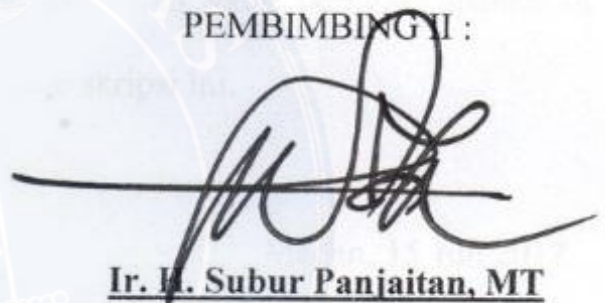
MUHAMMAD RIDWAN
128110024

PEMBIMBING I :



Ir. H. Irwan, MT

PEMBIMBING II :



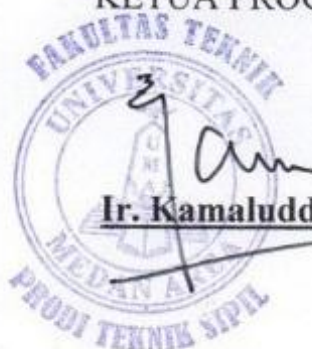
Ir. H. Subur Panjaitan, MT

DEKAN FAKULTAS TEKNIK :



Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc

KETUA PROGRAM STUDI :



Ir. Kamaluddin Lubis, MT

Tanggal lulus :

SURAT PERNYATAAN


Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah.

Saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan sanksi-sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.

Medan, 15 Juli 2017

METERAI
TEMPEL 
E48C8AEF622437083

6000
ENAM RIBU RUPIAH

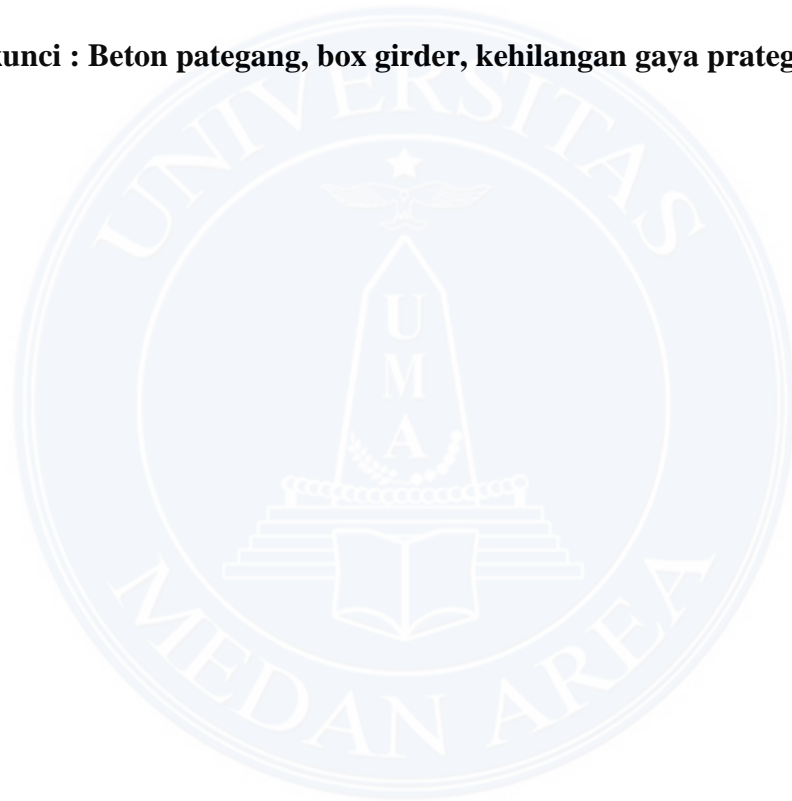

Muhammad Ridwan

12.811.0024

ABSTRAK

Perkembangan beton prategang semakin berkembang pesat seiring meluasnya teknologi konstruksi. Penggunaan beton prategang sangat mendukung pembangunan infrastruktur Indonesia, khususnya Jalan Layang Kereta Api Kualanamu di kota Medan yang menggunakan Box Girder dengan tinggi penampang 2400 mm sebagai komponen strukturalnya. Studi kasus beton prategang box girder Jalan Layang Kereta Api Kualanamu dengan bentang 40 meter menjelaskan keefektifitasan penampang girdernya yang memiliki tendon – tendon internal yang diisi kabel baja strand dia. 12,7 mm berjumlah 60 buah. Selanjutnya menganalisa persentase kehilangan gaya prategang yang terjadi pada tendonnya akibat perpendekan elastis, gesekan pada tendon, rangkai, susut pada beton dan sebagainya. Sebagai tambahan diperkenalkan langkah – langkah proses produksi beton prategang box girder mulai dari penulangan sampai pengecoran di pabrik beton pracetak.

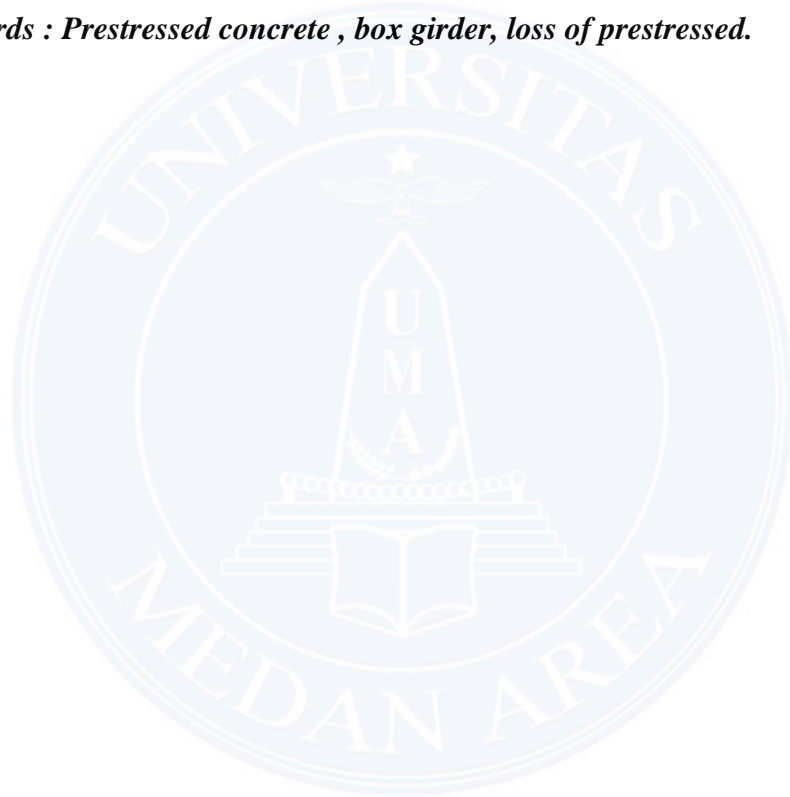
Kata kunci : Beton pategang, box girder, kehilangan gaya prategang.



ABSTRACT

The development of prestressed concrete is growing rapidly as the widespread construction technology . The use of prestressed concrete supports infrastructure development in Indonesia , especially Kualanamu Railway overpass in the city of Medan that use Box Girder with sectional height 2400 mm as a structural component . The case study of prestressed concrete box girder Railway flyover with spans of 40 meters Kualanamu explain sectional effectiveness girders where are internal tendons filled her strand steel cables. 12.7 mm totaling 60 pieces. Further analyzing the percentage loss of prestressing force that occurs in the tendon due to the shortening of the elastic , friction on the tendon , creep , shrinkage of the concrete and so on. Additionally introduced step by step production process prestressed concrete box girder ranging from reinforcement to casting in the precast concrete plant .

Keywords : Prestressed concrete , box girder, loss of prestressed.



DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR NOTASI	viii
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Pembatasan Masalah.....	3
1.5. Metodologi Pembahasan.....	4
1.6. Manfaat Penelitian.....	4
BAB II LANDASAN TEORI	5
2.1. Umum.....	5
2.2. Precast Concrete Box Girder.....	6
2.2.1. Disain Material.....	6
2.2.2. Kehilangan Gaya Prategang.....	15
2.3.3. Precast Segmental Box Girder.....	18

2.2.4.	Elemen Struktural Jembatan Segmental Box	
	Girder.....	18
BAB III	KEHILANGAN TEGANGAN.....	20
3.1.	Umum.....	20
3.2.	Precast Concrete Box Girder.....	23
3.3.	Perencanaan Struktur Atas.....	25
3.4.	Perhitungan Precast Box Girder.....	28
3.4.1.	Analisa Penampang.....	29
3.5.	Pembebanan Box Girder Prestress.....	32
3.5.1.	Berat Sendiri.....	32
3.5.2.	Beban Mati Non Komposit.....	32
3.5.3.	Berat Sendiri.....	33
3.6.	Gaya Prestress, Eksentrisitas Dan Jumlah Tendon.....	34
3.6.1.	Kondisi Awal (Saat Transfer).....	34
3.6.2.	Kondisi Akhir (Saat Service).....	38
3.6.3.	Posisi Tendon.....	40
3.7.	Kehilangan Tegangan (Loss Of Prestress).....	44
3.7.1.	Kehilangan Tegangan Akibat Gesekan Angkur (Anchorage Friction).....	44
3.7.2.	Kehilangan Tegangan Akibat Gesekan Cable (Jack Friction).....	44
3.7.3.	Kehilangan Tegangan Akibat Pemendekan Elastis (Elastic Shortening).....	45

3.7.4.	Kehilangan Tegangan Akibat Relaxation Of Tendon.....	48
BAB IV	PENULANGAN BOX GIRDER.....	53
4.1.	Zona Pengangkuran.....	53
4.1.1.	Panjang Penyaluran.....	53
4.2.	Perhitungan Sengkang Untuk Bursting Steel.....	54
4.3.	Perencanaan Jumlah Bursting Steel Internal Tendon.....	57
4.3.1.	Material Baja Sengkang Bursting Steel.....	58
4.3.2.	Sengkang Pada Internal Tendon Pada Segmen Box Girder.....	58
4.4.	Penulangan Pada Segmen Box Girder.....	64
4.4.1.	Analisis Batang Tarik.....	64
4.4.2.	Desain Penulangan Box Girder.....	65
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	69
5.1.	Kesimpulan.....	69
5.2.	Saran.....	69
	DAFTAR PUSTAKA.....	70
	LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

Tabel	Judul	Hal
1. Tabel 2.1	Nilai α & β	7
2. Tabel 2.2	Spesifikasi kabel strand	9
3. Tabel 3.1	Penempatan Tebal Pelat Pada Penampang Segmen Box Girder	27
4. Tabel 3.2	Momen Inersia Penampang Segmen Box Girder	30
5. Tabel 3.3	Tabel Pembagian Tendon Internal	37
6. Tabel 3.4	Jumlah Internal Tendon Serta Segmen Box Girder	37
7. Tabel 3.5	Eksentrisitas Masing – Masing Tendon	41
8. Tabel 3.6	Sudut Angkur Tendon Internal	42
9. Tabel 3.7	Koordinat Internal Tendon	43
10. Tabel 3.8	Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang Yang Terjadi Pada Box Girder	52
11. Tabel 4.1	Jumlah Sengkang Bursting Steel Arah Vertikal – TST	62
12. Tabel 4.2	Jumlah Sengkang Bursting Steel Arah Horizontal – TST	62
13. Tabel 4.3	Jumlah Sengkang Bursting Steel Arah Vertikal – TSB	63
14. Tabel 4.4	Jumlah Sengkang Bursting Steel Arah Horizontal – TSB	63
15. Tabel 4.5	Penempatan Tebal Pelat Pada Penampang Segmen Box Girder	65

DAFTAR GAMBAR

Tabel	Judul	Hal
1. Gambar 2.1	Potongan Melintang Balok Box Girder Ditengah Bentang	5
2. Gambar 2.2	Strand prategang 7 kawat (a) standard dan (b) yang dipadatkan	8
3. Gambar 2.3	Truck Pengangkut Semen Portland	10
4. Gambar 2.4	Material Pasir Cor	11
5. Gambar 2.5	Material Batu Pecah	12
6. Gambar 2.6	Sumber Air Dari Sumur Bor Untuk Pengadukan Beton	15
7. Gambar 2.7	Tipe Precast Box Girder Jalan Layang Kereta Api Kualanamu	19
8. Gambar 3.1	Konfigurasi Tendon Prategang P39 – P40	21
9. Gambar 3.2	Potongan melintang segmen box girder P39 – P40	22
10. Gambar 3.3	Rakitan Tulangan Box Girder Pada Rebar Cage	23
11. Gambar 3.4	Setting Ketegakkan Cetakan Box Girder Oleh Surveyor	24
12. Gambar 3.5	Pemasangan Control Point Sebagai Acuan Untuk Menentukan Elevasi Box Girder	24
13. Gambar 3.6	Pekerjaan Pengecoran Segmen Box Girder	25
14. Gambar 3.7	Potongan Melintang Segmen Box Girder P39 – P40 Serta Komponen Struktur Atas	26
15. Gambar 3.8	Dimensi Penampang Box Girder	27
16. Gambar 3.9	Cross Section Box Girder Ditengah Bentang	29
17. Gambar 3.10	Elevasi Balok Prategang	34
18. Gambar 3.11	Penampang dan Tegangan Lentur	35
19. Gambar 3.12	Posisi Tendon Internal Pada Penampang Segmen Tumpuan	37
20. Gambar 3.13	Posisi Tendon Internal Di Tengah Bentang	40
21. Gambar 3.14	Posisi Tendon Internal Di Tumpuan	41
22. Gambar 3.15	Detail Casting Internal Tendon	42
23. Gambar 3.16	Trace Masing – Masing Tendon	43
24. Gambar 3.17	Elevasi Internal Tendon Sisi Bawah	44
25. Gambar 3.18	Sudut pada Segmen BC	44
26. Gambar 4.1	Bentuk Bursting Steel Tendon	54
27. Gambar 4.2	Konfigurasi Tendon Prestress TST + TSB	57
28. Gambar 4.3	Detail Bursting Steel Internal Tendon TST	58
29. Gambar 4.4	Detail Bursting Steel Internal Tendon TSB	60
30. Gambar 4.5	Dimensi Penampang Box Girder	65
31. Gambar 4.6	Penulangan Segmen Box Girder	68

DAFTAR NOTASI

a	= lebar sengkang bursting steel arah vertikal
a_1	= lebar plat angkur arah vertikal
A	= luas penampang box girder pre-stress
A_g	= luas penampang beton
A_n	= luas bersih penampang beton
A_p	= luas penampang baja prategang
A_t	= transformasi penampang
A_s	= luas tulangan susut
A_{st}	= luas tampang nominal satu strand
A_{ra}	= luas tulangan sengkang bursting steel arah vertikal
A_{rb}	= luas tulangan sengkang bursting steel arah horizontal
b	= lebar sengkang bursting steel arah horizontal
b_1	= lebar plat angkur arah horizontal
C_R	= rangkai pada baja
d	= draw in
D	= diameter sengkang bursting steel
e_s	= eksentrisitas tendon
E_c	= modulus elastis strands
E_s	= modulus elastik balok beton prestress
f'_c	= kuat tekan beton
f_{ci}'	= kuat tekan beton pada keadaan awal (saat transfer)
f_{cir}	= tegangan dibeton pada level pusat berat baja segera setelah transfer
f_{cds}	= tegangan dibeton pada level pusat berat baja akibat semua beban mati tambahan yang bekerja setelah prategang diberikan
f_{pe}	= tegangan efektif pada baja prategang
f_{pi}	= tegangan awal pada baja prategang
f_{ps}	= tegangan pada tulangan prategang pada saat penampang mencapai kekuatan nominalnya
f_{pu}	= kuat tarik strands

f_{py}	= tegangan leleh strand
f_s	= tegangan ijin tarik baja sengkang
f_{se}	= tegangan efektif pada tulangan prategang
f_y	= tegangan leleh baja
H	= tinggi box girder pre-stress
i	= jari-jari inersia penampang box girder
I_b	= momen inersia terhadap alas balok
I_x	= momen inersia terhadap titik berat balok
K	= mutu beton box girder prestress
k_c	= koefisien yang tergantung pada kelembaban udara, untuk perhitungan diambil kondisi kering dengan kelembaban udara
k_p	= koefisien yang tergantung pada luasan tulangan baja memanjang non prestress
k_{tn}	= koefisien yang tergantung pada waktu (t) dimana pengerasan terjadi dan tebal teoritis
L	= panjang bentang
L_{max}	= jarak pengaruh kritis slip angkur dari ujung
M_{bs}	= momen maksimum di tengah bentang
n	= jumlah sengkang bursting steel yang diperlukan
n_s	= jumlah strand minimal yang diperlukan
P	= gaya prategang sisa (akibat gesekan)
P_{bs}	= beban putus strand
P_{bta}	= bursting steel untuk sengkang arah vertikal
P_{btb}	= bursting steel untuk sengkang arah horizontal
P_e	= gaya prategang efektif (setelah semua kehilangan tegangan diperhitungkan)
P_{eff}	= gaya prestress akhir setelah kehilangan tegangan (loss of prestress)
P_j	= Gaya prestress akibat jacking (jacking force)
P_o	= loss of prestress akibat gesekan angkur
P_t	= tegangan beton pada level bajanya oleh pengaruh gaya prestress
P_x	= loss of prestress akibat gesekan kabel
Q_{bs}	= berat sendiri box girder prestress
r_a	= rasio plat angkur arah vertikal

r_b	= rasio plat angkur arah horizontal
R_E	= relaksasi pada baja
s	= jarak tulangan sengkang bursting steel yang diperlukan
S_H	= susut pada beton
t	= waktu pengerasan beton
T	= temperatur udara rata – rata
V_{bs}	= gaya geser maksimum di tumpuan
W	= gesekan di sepanjang tendon
W_a	= tahanan momen sisi atas
W_b	= tahanan momen sisi bawah
W_c	= berat beton prestress
y_a	= letak titik berat box girder terhadap sisi atas
y_b	= letak titik berat box girder terhadap sisi bawah
z_o	= ditetapkan jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah box girder
σ_{bt}'	= tegangan beton pada level bajanya oleh pengaruh gaya prestress
σ_{cr}	= tegangan akibat creep
σ_{pi}	= tegangan baja pre-stress sebelum loss of prestress (di tengah bentang)
σ_{sh}	= tegangan susut
$\Delta\sigma_{pe}'$	=kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik dengan memperhitungkan pengaruh berat sendiri
$\Delta\sigma_{pe}$	= kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik tanpa pengaruh berat sendiri
$\Delta\sigma_{sc}$	=loss of prestress jangka panjang
ΔP_e	=loss of prestress akibat pemendekan elastis
ϵ_b	=regangan dasar susut (basic shrinkage strain)
μ	= koefisien gesekan
a_t	= Pengubah dari sudut kabel dari gaya ke jarak x
β_p	= Deviasi angular wobble terhadap variasi selongsong tendon

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim

Alhamdulillah. Puji syukur kepada Allah SWT, Tuhan Yang Maha Esa akhirnya penyusunan skripsi ini dapat penulis selesaikan dengan baik, dimana skripsi ini merupakan suatu syarat yang harus dipenuhi dalam menyelesaikan sarjana (S1) program studi Teknik Sipil di Fakultas Teknik, Universitas Medan Area (UMA).

Penulis menyadari bahwa selesainya skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, dukungan dan bantuan dari semua pihak, hingga terselesaikannya skripsi ini dengan judul **“Analisa Struktur Box Girder Jalan Layang Kereta Api Kualanamu”**. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih yang tulus kepada :

1. Bapak Prof. Dr. H.A. Ya'kub Matondang, MA selaku Rektor Universitas Medan Area.
2. Bapak Prof. Dr. Dadan Ramdan, M.Eng, M.Sc selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Medan Area.
3. Bapak Ir. Kamaluddin Lubis, MT selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Medan Area.
4. Bapak Ir. H. Irwan, MT selaku Dosen Pembimbing I penulis, dan Bapak Ir. H. Subur Panjaitan, MT selaku Dosen Pembimbing II penulis yang telah banyak meluangkan waktu, tenaga dan pikiran dalam memberikan bimbingan kepada penulis.
5. Bapak Ir. H. Edy Hermanto, MT, Bapak Ir. Melloukey Ardan, MT, Bapak Ir. Amsuardiman, MT, Bapak Ir. Marwan Lubis, MT, Ibu Ir. Nurmaidah, MT, dan Ibu Ir. Nuril Mahda Rangkuti, MT yang telah banyak memberikan pengajaran bidang teknik sipil di program studi teknik sipil Universitas Medan Area.
6. Keluarga yang sangat penulis sayangi serta cintai . Hormat dan sujud penulis haturkan kepada Ayahanda Alm. Muhammad Yunus dan Ibunda Rusniwati, yang telah merawat dan memberikan penulis kasih sayang yang tiada henti, mendidik, membimbing, dan memberikan motivasi semangat

serta doa kepada penulis agar penulis mampu mencapai cita – cita yang mulia dan agar kelak menjadi anak yang berguna bagi agama, keluarga dan bangsa Indonesia.

7. Kepada mahasiswa/siswi program studi teknik sipil, khususnya teman – teman sejawat angkatan 2012.
8. Bapak Pimpinan dan seluruh karyawan PT. Wijaya Karya Beton Tbk, khususnya rekan kerja Teknik dan Mutu yang memberikan kesempatan kepada penulis untuk memperdalam studi teknik sipil di Universitas Medan Area.

Penulis sepenuhnya menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari segi penyajian maupun pembahasannya. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya serta kritik dan saran sangat penulis harapkan demi kesempurnaan penulisan dimasa yang akan datang.

Medan, 15 Juli 2017

Muhammad Ridwan
12.811.0024

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sebagai bagian dari rencana pembangunan “Indonesia-sentris” yang tidak lagi terkonsentrasi di Pulau Jawa, pemerintah pun mulai gencar membangun infrastruktur perkeretaapian di Pulau Sumatera. Salah satunya pembangunan jalan layang kereta api sepanjang ± 8 km yang merupakan bagian dari rencana membangun jalur Stasiun Medan-Stasiun Bandara Kualanamu dengan total panjang 27 km.

Struktur girder memanjang dari jalan layang tersebut adalah jenis beton prategang box girder dengan bentang 40 m dan lebar 10,3 m. Yang dalam konstruksinya girder – girder tersebut dicetak secara segmental di pabrik precast.

Tujuan pemberian gaya prategang adalah untuk menimbulkan tegangan awal dan lendutan awal (chamber) yang berlawanan dengan tegangan – tegangan yang ditimbulkan oleh beban – beban kerja. Dengan demikian konstruksi dapat memikul beban yang lebih besar lagi tanpa harus merubah mutu betonnya. Seluruh penampang beton menjadi efektif, akibat baja yang diberi gaya prategang dan diangkurkan ke beton. Sedangkan pada beton bertulang hanya sebagian dari penampang yang berada di atas garis netral yang bermanfaat.

Untuk memberikan gaya prategang pada box girder di lapangan dikenal dengan proses stressing. Stressing girder adalah proses penarikan kabel tendon yang ada didalam girder sebagai beton prategang. Pemberian tegangan pada kabel tendon (stressing) dapat dilakukan dengan dua sistem, pre-tensioning dan post-tensioning.

Pre-tensioning adalah prinsip cara penegangan dengan tendon ditegangkan prategang dipertahankan sampai beton cukup keras. Post-tensioning adalah prinsip cara penegangan dengan kondisi beton yang telah terlebih dahulu dicor dan dibiarkan mengeras sebelum diberi gaya prategang, dan sistem inilah yang digunakan dalam proses stressing box girder pada jalan layang kereta api Kualanamu.

1.2. Rumusan Masalah

Dilihat dari latar belakang yang telah diuraikan, maka diperoleh rumusan masalah dalam penelitian ini antara lain :

1. Bagaimana perhitungan gaya – gaya yang diterima beton pratekan box girder dalam pelaksanaanya ?
2. Bagaimana melakukan analisa penampang suatu struktur balok jembatan beton pratekan box girder ?
3. Bagaimana langkah – langkah dalam memproduksi struktur beton pracetak box girder ?
4. Bagaimana melakukan analisa struktur pada balok pratekan akibat kehilangan gaya prategang (loss of prestress) ?
5. Bagaimana penyelidikan tentang distribusi tegangan pada zona pengangkuran ?
6. Berapa persentase rasio tulangan sengkang yang digunakan dalam segmen standar box girder ?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dari penulisan ini yaitu untuk mengetahui gaya – gaya yang bekerja akibat pelaksanaan jalan layang kereta api Kualanamu – Medan, Sumatera Utara. Selanjutnya melakukan analisa penampang yang dapat menahan lenturan akibat gaya – gaya yang bekerja di atasnya, sehingga diketahui besar persentase kehilangan gaya prategang (loss of prestress) pada bentang jalan layang tersebut.

1.4. Pembatasan Masalah

Pembatasan masalah yang diuraikan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Balok pratekan yang dianalisa pada studi kasus ini adalah segmen balok yang digunakan pada jalan layang kereta api Kualanamu – Medan, Sumatera Utara.
2. Dari Track kereta api sepanjang ± 8 km, bentang yang ditinjau hanya bagian Pier 39 –Pier 40 sepanjang 40 m.
3. Penganalisaan tidak termasuk desain abutment dan karakteristik pondasi yang digunakan.
4. Penganalisaan tidak termasuk harga satuan dari bahan dan material yang digunakan.
5. Penganalisaan tidak termasuk durasi pekerjaan dalam pelaksanaan konstruksinya dilapangan.
6. Penganalisaan tulangan hanya untuk mengetahui persentase rasio tulangan sengkang segmen box girder tipe standar.

1.5. Metodologi Pembahasan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini secara garis besar berupa :

1. Dengan mengambil data – data yang diperoleh dari lapangan (PT. Wijaya Karya Beton Tbk).
2. Menganalisa besarnya beban – beban yang terjadi pada struktur box girder dengan metode SNI T-12 2004

1.6. Manfaat Penelitian

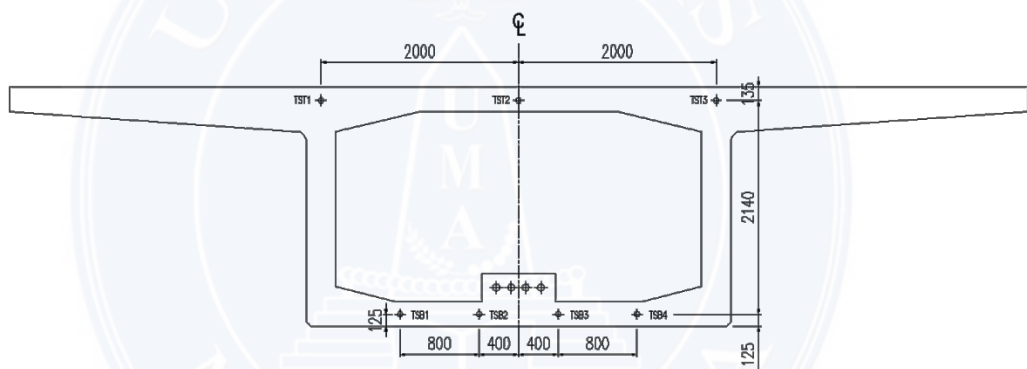
Manfaat penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan mengenai jembatan yang menggunakan struktur balok beton prategang dengan perhitungan – perhitungan yang umum digunakan dalam mendesain struktur balok prategang.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Umum

Girder jalan layang Stasiun Medan-Stasiun Bandara Kualanamu berupa gelagar PC Box Girder dengan bentang 40 m dibagi dalam 15 (lima belas) segmen yang selanjutnya akan dihubungkan antar segmennya dengan proses stressing (pemberian gaya prategang). Gelagar jalan layang tersebut terbuat dari bahan beton dengan mutu 500 kg/cm^2 yang dikompositkan terhadap ballast dan bantalan jalan rel beton dengan 350 kg/cm^2 .



Gambar 2.1 Potongan Melintang Balok Box Girder Ditengah Bentang

Dengan menerapkan teknologi beton pracetak, pekerjaan struktur yang masih harus dilaksanakan di lapangan adalah pekerjaan struktur bawah (pondasi), di mana proses pelaksanaannya dapat bersamaan dengan kegiatan produksi beton pracetak. Pengaturan jadwal produksi segmen beton pracetak. Pengaturan jadwal produksi segmen beton pracetak dapat diatur sedemikian rupa sehingga segmen – segmen yang akan dipasang lebih awal dapat diproduksi lebih dahulu dan pada saatnya nanti segmen tersebut telah cukup umur.

2.2. Gaya Prategang

Pada langkah perhitungan besar gaya dongkrak (jacking force) ada beberapa hal yang harus dipertimbangkan. Adapun hal-hal tersebut adalah :

2.2.1. Disain Material

(1) Beton

Beton yang digunakan untuk konstruksi beton prategang memiliki komposisi standar yaitu semen, air, agregat dan jika perlu ditambahkan admixture. Besar perbandingan antar ketiga bahan tersebut tergantung mutu beton yang akan dicapai. Beton untuk beton prategang biasanya merupakan beton bermutu tinggi. Menurut ACI, beton yang boleh mengalami prategang adalah beton yang telah berumur 28 hari dengan kuat tekan beton telah mencapai 30 sampai 40 MPa.

Besaran mekanis beton yang telah mengeras dapat dibedakan dalam dua kategori, besaran sesaat atau jangka pendek dan besaran jangka panjang. Besaran jangka pendek yaitu kuat tekan, tarik, geser, dan kuat yang diukur dengan modulus elastisitas. Sedang besaran jangka panjang yaitu rangkai dan susut beton.

a. Kuat tekan

Kuat tekan beton tergantung dari jenis campuran, besaran agregat, waktu dan kualitas perawatan. Beton dengan kekuatan tinggi jelas jauh lebih menguntungkan. Kuat tekan beton f'_c didasarkan pada pengujian benda uji silinder standart 6m x 12 in, yang diolah pada kondisi laboratorium standart dan diuji pada laju pembebanan tertentu selama 28 hari. Spesifikasi standar yang digunakan di Indonesia adalah dari SNI.

Untuk menentukan kekuatan beton pada t waktu pada umur beton 28 hari dengan menggunakan persamaan.

$$f'c = \frac{t}{a + Bt} f'c(28)$$

dengan :

$f'c(t)$ = kekuatan beton umur t hari

$f'c(28)$ = kekuatan beton usia 28 hari

Dan nilai α & β pada tabel berikut

Tabel 2.1 Nilai α & β [Gilbert, 1990]

Kondisi	α	β
Normal Portland cement		
Beton moist cured	4.0	0.85
Beton steam cured	1.0	0.95
Hight early cement		
Beton moist cured	2.3	0.92
Beton steam cured	0.7	0.98

b. Kuat tarik

Kuat geser lebih sulit ditentukan dengan cara eksperimental dibandingkan dengan pengujian – pengujian lainnya dikarenakan sulitnya untuk mengisolasi tegangan geser dari tegangan lainnya. Kontrol desain structural jarang didasarkan pada kuat geser karena besarnya kuat geser itu sendiri dibatasi secara kontiniu pada nilai yang lebih kecil untuk mencegah beton mengalami tarik diagonal.

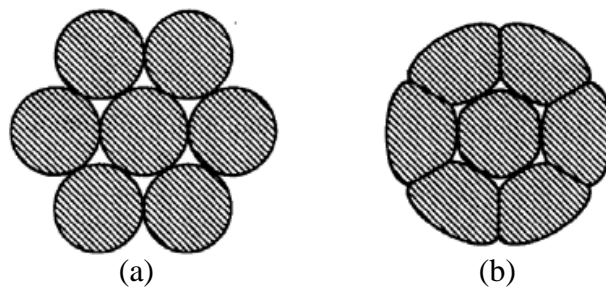
(2) Baja

a. Baja prategang

Baja pada konstruksi beton prategang merupakan penyebab terjadinya pemendekan pada beton dikarenakan pengaruh rangkai dan susut. Kehilangan gaya prategang pada baja sesaat setelah penegangan pada baja akibat gesekan disepanjang tendon atau saat pengangkutan ujung (*draw-in*) akan mempengaruhi gaya prategang pada beton dengan angka yang cukup signifikan.

Untuk tujuan keefektifan desain, total kehilangan gaya prategang harus relatif kecil dibandingkan gaya prategang yang bekerja. Kondisi ini dipengaruhi oleh jenis baja prategang yang digunakan dalam konstruksi. Pada proyek ini baja yang digunakan adalah baja strand sebagai tulangan prategang dan baja tulangan biasa sebagai tulangan geser.

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 A416. Baja strand difabrikasi dengan memuntir beberapa kawat secara bersamaan. Seven wire strand terdiri dari 7 (tujuh) untaian kawat, dengan posisi kawat 1 (satu) untaian ditengah dan 6 (enam) sisanya mengelilingi satu kawat pusat. *Strand low relaxation* digunakan untuk mencapai konstruksi yang efisien.



Gambar 2.2 Strand prategang 7 kawat (a) standard dan (b) yang dipadatkan

Kawat – kawat stress-relieved adalah kawat tunggal yang ditarik dingin yang sesuai dengan standart ASTM A421; stress-relieved strand mengikuti standart ASTM A 416. Standar terbuat dari tuju buah kawat dengan memuntir enam diantaranya pada pitch sebesar 12 sampai 16 kali diameter disekeliling kawat harus yang sedikit lebih besar. Pada proyek ini digunakan baja strand dengan spesifikasi PC strand ASTM.

A416 / A416M – 1998 Grd 270 Low Relaxation, merek : Kingdom

Tabel 2.2 Spesifikasi kabel strand

ΓΡΑΔΕ	NOMINAL ΔΙΑΜΕΤΕΡ (μμ)	ΤΟΛΕΡΑΝΣ Ε (μμ)	NOMINAL ΑΡΕΑ ΟΦΣΕΧΤΙΟΝ (μμ)	NOMINAL ΩΘΕΙΗ Τ Κγ/1000μ	MINIMUM BREAKING Γ ΛΟΑΔ νοτ λασσ τη αν (KN)	MINIMUM ΜΨΙΕΛΔ ΛΟΑΔ ατ 1% εζτεν σιον (KN)	ΕΛΟΝΓΑΤΙΟ Ν Νοτ λασσ τη αν (%)	ΡΕΛΑΞΑΤΙΟ Ν ςΑΛΥΕ 1000 ηρσ νοτ γρεατερ τη αν (%)	ΧΗΜΙΚΑΑ ΧΟΜΠΟΣΙΤΙ ΟΝ
250	9.53	± 0.41	51.61	405	89.0	80.1	3.5	2.5	X:0.77–0.85 Σι: 0.15–0.30 Μν:).60–0.90
	11.11		69.68	548	120.1	108.1			
	12.70		92.90	730	160.1	144.1			
	15.24		139.35	1094	240.2	216.2			
	9.53		54.84	432	102.3	92.1			
270	11.11	+0.66	74.19	582	137.9	124.1	3.5	3.5	Π:0.025Μαξ Σ:0.025Μαξ
	12.70	-0.15	98.71	775	183.7	165.3			
	15.24		140.00	1102	260.7	234.6			

(3) Semen Portland (PC)

Semen adalah bagian yang terpenting dalam pembuatan beton. Fungsi semen sebagai bahan pengikat yang kohesif. Pengikatan dan pengerasan semen hanya dapat terjadi karena adanya air. Dan air inilah yang dapat melangsungkan reaksi-reaksi kimia guna melarutkan bagian dan semen sehingga menghasilkan senyawa-senyawa hidrat yang dapat mengeras. Dari hal tersebut diatas, kekuatan beton dapat dipengaruhi oleh mutu semen dan air yang dipakai. Mengenai air akan diuraikan dalam bahagian tersendiri. Dalam proyek ini semen yang di pergunakan adalah semen andalas yang berasal dari aceh. Karena dibuat di Indonesia dan dengan

kualitas yang tinggi, maka semen tidak perlu lagi diperiksa dilaboratorium.



Gambar 2.3 Truck Pengangkut Semen Portland

Permasalahan pada semen adalah masalah penyimpanan dan penimbunan. Semen yang berada dalam kantong semen yang sobek atau rusak jahitannya tidak dapat dipergunakan lagi untuk pekerjaan beton karena telah bereaksi dengan udara luar (udara yang telah banyak mengandung air dan zat kimia yang mampu mengurangi mutu semen).

(4) Pasir

Pasir untuk untuk adukan pasangan, adukan plesteran dan beton bitumen harus memenuhi syarat-syarat sebagai berikut :

1. Pasir harus, tajam dan keras, harus bersifat kekal artinya, tidak pecah atau hancur oleh pengaruh-pengaruh cuaca seperti terik matahari dan hujan.
2. Pasir harus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (ditentukan terhadap berat kering), yang diartikan dengan Lumpur ialah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0,063 mm. Apabila kadar Lumpur melalui 5% maka agregat harus dicuci.
3. Pasir tidak boleh mengandung bahan-bahan organis terlalu banyak yang harus dibuktikan dengan percobaan warna dan adbrams-harder (dengan larutan NH

OH). Agregat halus tidak memenuhi percobaan warna ini dapat juga dipakai, asal kekuatan tekan adukan agregat yang sama.

4. Pasir terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya apabila diayak dengan susunan diatas ayakan yang di tentukan dalam syaratsyarat dibawah ini :

- Sisa diatas ayakan 4 mm, harus minimum 2% berat.
- Sisa diatas ayakan 1 mm, harus minimum 10% berat.
- Sisa diatas ayakan 0,25 mm, harus; berkisar antara 80% dan 95% berat.



Gambar 2.4 Material Pasir Cor

(5) Agregat Kasar

Agregat kasar untuk adukan beton dapat berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari batu-batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari pemecahan batu. Pada umumnya yang dimaksud dengan agregat kasar adalah agregat dengan besar butiran lebih dari 5 mm.



Gambar 2.5 Material Batu Pecah

Menurut ukuran kerikil dapat dibagi sebagai berikut :

- a. Ukuran butiran 5 – 10 mm disebut kerikil halus
- b. Ukuran butiran 10 – 20 mm disebut kerikil sedang
- c. Ukuran butiran 20 – 40 mm disebut kerikil kasar
- d. Ukuran butiran 40 – 70 mm disebut kerikil kasar sekali

Batu pecah atau kerikil adalah bahan yang diperoleh dari batu pecah menjadi pecah-pecahan berukuran 5 – 70 mm. Pemecahan biasanya menggunakan mesin pemecah batu (jawbreaker / crusher). Agregat kasar harus memenuhi syarat-syarat sebagai mana tercantum dalam PBI 71 NI 2:

1. Agregat kasar untuk beton berupa kerikil sebagai hasil disintegrasi alami dari bata-batuan atau berupa batu pecah. Pada umumnya yang dimaksud dengan agregat kasar adalah agregat dengan kasar butir lebih dari 5 mm sesuai dengan syarat-syarat pengawasan mutu agregat untuk berbagai mutu beton.
2. Agregat harus terdiri dari butir-butir yang keras dan tidak berpori, agregat kasar yang mengandung butir-butir pipih dapat dipakai, apabila jumlah butiran pipih tersebut tidak melampaui 20% dan berat agregat seluruhnya. Butir-butir agregat kasar harus bersifat kekal artinya tidak hancur oleh pengaruh cuaca, seperti terik

matahari dan hujan.

3. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1 (satu) % (ditentukan terhadap berat kering), yang diartikan dengan lumpur adalah bagian-bagian yang dapat melalui ayakan 0,063 nun. Apabila kasar lumpur melampaui 1% maka agregat harus dicuci.
4. Agregat kasar tidak boleh mengandung zat-zat yang reaktif alkali.
5. Kekerasan dan butir-butir kasar diperiksa dengan bejana penguji dari Rudeloff dengan beban penguji zat, yang mana harus dipenuhi syarat-syarat berikut :
 - Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5 – 1,9 mm, lebih dari 24 % berat.
 - Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 19 – 30 mm, lebih dari 22 % atau dengan mesin pengawas Los Angeles.
6. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan susunan ayakan yang ditentukan dalam pasal 3.5 ayat 1 harus memenuhi syarat sebagai berikut :
 - Sisa diatas ayakan 31,5 nun harus 0 % berat
 - Sisa diatas ayakan 4 mm harus berkisar 90 % - 98 % berat, selisih antara sisa-sisa kumulatif diatas dua ayakan yang berurutan, adalah maksimum 60 % dan minimum 10 % berat.
7. Besar butir agregat maksimum tidak boleh terdiri dari pada seperlima jarak terkecil antara bidang-bidang samping dan cetakan, sepertiga dari tebal plat atau tiga perempat dari jarak bersih minimum antara batang-batang atau berkas-berkas tulangan, penyimpangan dari pembatasan ini diizinkan, apabila menurut penilaian pengawas ahli, cara-cara pengecoran beton adalah sedemikian rupa hingga terjamin tidak terjadinya sarang-sarang kerikil.

(6) Air

Penggunaan air terutama untuk campuran beton sangat penting sekali, sebab fungsi air adalah sebagai katalisator dalam hal pengikatan semen terhadap bahan-bahan penyusun. Untuk maksud ini besarnya pemakaian air dibatasi menurut presentase yang direncanakan. Apabila air terlalu sedikit digunakan dalam proses pembuatan beton, campuran tidak akan baik dan sukar dikerjakan, sebaliknya bila air terlalu banyak dalam adukan beton, kekuatan beton akan berkurang dalam penyusutan yang terjadi akan besar setelah beton mengeras.

Air yang digunakan untuk adukan beton adalah air bersih, dan memenuhi syarat-syarat tercantum dalam PBI 71 NI-2 pasal 3.6 yaitu :

1. Air untuk pembuatan dan perawatan beton tidak boleh mengandung minyak, asam alkali, garam-garaman, bahan-bahan organik dan bahan-bahan lain yang merusak beton atau baja tulangan.
2. Apabila terdapat keraguan-keraguan mengenai air, dianjurkan untuk mengirimkan contoh-contoh air ke lembaga pemeriksaan bahan-bahan yang diakui untuk diselidiki sampai seberapa jauh air itu mengandung zat-zat yang dapat merusak tulangan.
3. Apabila pemeriksaan contoh air dapat dilakukan, maka dalam hal adanya keraguan mengenai air harus diadakan percobaan perbandingan antara kekuatan tekan motel semen + pasir dengan memakai air suling. Air tersebut dianggap dapat dipakai apabila kekuatan tekan motel dengan memakai air itu pada umur 7 dan 28 hari paling sedikit adalah 90 % dari kekuatan tekan motel dengan memakai air suling pada umur yang sama.
4. Jumlah air yang dipakai untuk membuat adukan beton dapat ditentukan dengan ukuran berat dan harus dilakukan setepat-tepatnya.



Gambar 2.6 Sumber Air Dari Sumur Bor Untuk Pengadukan Beton

2.2.2. Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang dapat disebabkan oleh beberapa faktor antara lain (T.YLin, 1988):

a. Perpendekan elastis beton (ES)

Pada sistem ini penarikan post-tension dengan jumlah kabel banyak, pemendekan elastis pada beton terjadi pada tendon yang pertama kali stressing, dan nilai minimum pada tendon yang terakhir kali stressing. Besarnya pemendekan elastis pada beton dapat dihitung dengan menggunakan persamaan persamaan dari ACI 318-95, Chapt.18.6 berikut

$$ES = (K_{es} \cdot E_s \cdot f_{cir} / E_c) \cdot A_s$$

b. Gesekan di sepanjang tendon (W)

Pada sistem penarikan post-tension, gesekan antara tendon dengan selongsongnya tentu tidak dapat dihindarkan. Gesekan yang terjadi akan mengurangi besar gaya prategang yang diterima tendon. Besar kehilangan gaya prategang akibat hal ini menurut AASHTO 1992, Chapt.9.16.1 dapat dihitung dengan menggunakan persamaan ;

$$P_x = P_o * e^{-\mu(\alpha+k*x)}$$

Dengan :

P_x = Gaya pada tendon ditiap titik x

P_o = Gaya pada tendon di ujung dongkrak (jacking force)

μ = Koefisien gesekan

α_t = Pengubah dari sudut kabel dari gaya ke jarak x

β_p = Deviasi angular wobble terhadap variasi selongsong tendon

c. Slip anchorage

Slip atau draw-in pada tendon terjadi setelah proses stressing dilakukan dan tendon akan diangkur-kan ke beton. Besar-nya slip tergantung pada jenis ankur. Untuk jenis ankur wwdge yang biasa digunakan pada baja strand, besar slip (Δ) sekitar 6 mm. Nilai (Δ) juga dipengaruhi oleh jarak spasi pada ankur.

Kehilangan gaya pratengan pada bagian ini hampir mirip dengan kehilangan akibat gesekan, bedanya hanya pada nilai μ dan β_p yang bernilai sama sehingga besar (Δ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan

$$x = \sqrt{d * A_s * (E_s / m)}$$

Dengan :

d = draw in

A_s = Luasan penampang baja prategang

E_s = Elastisitas baja strand

$$m = (P_o - P) / L$$

Dengan :

- P_0 = Gaya prategang awal
- P = Gaya prategang sisa (akibat gesekan) $x = L$
- L = Panjang bentang

d. Rangkak pada baja (CR)

Kehilangan rangkak terjadi hanya pada struktur yang dibebani secara terus menerus. Besarnya nilai kehilangan gaya prategang yang terjadi akibat rangkak dapat dihitung melalui persamaan (ACI 318-95, Chapt.18.6)

$$C_R = K_{cr} * (E_s/E_c) * (f_{cir}-f_{cds})$$

Dengan :

- K_{cr} = 2.0 untuk komponen struktur pratarik
- = 1.6 untuk komponen struktur pasca tarik

f_{cir} = Tegangan dibeton pada level pusat berat baja segera setelah transfer

f_{cds} = Tegangan dibeton pada level pusat berat baja akibat semua beban mati tambahan yang bekerja setelah prategang diberikan

e. Susut pada beton (SH)

Kehilangan gaya prategang akibat susut pada baja dipengaruhi oleh besarnya regangan susut baja (ϵ_e). Regangan susut pada beton dibagian tendon dipengaruhi oleh tegangan pada beton pada daerah itu. Tegangan beton bervariasi terhadap waktu, maka akan sulit ditentukan besarnya. Nilai kehilangan gaya prategang yang hilang akibat susut pada beton dapat dihitung melalui persamaan berikut (ACI 318-95, Chapt.18.6)

$$S_H = 8.2E-06 * K_{sh} * E_s * (1 - 0.06 * V/S) * (100 - R_H)$$

f. Relaksasi pada baja

Kehilangan gaya tendon akibat relaksasi dipengaruhi oleh tegangan izin baja strand. Seperti halnya dengan rangkai dan susut, tegangan pada baja menurun sejalan dengan waktu. Penurunannya menjadi semakin cepat jika ditambah lagi dengan pengaruh relaksasi. Untuk mengetahui besarnya kehilangan gaya pretegang akibat relaksasi baja yang dipengaruhi oleh rangkai dan susut, dapat digunakan persamaan berikut (ACI 318-95, Chapt.18.6)

$$R_E = (K_{re} - J^*(S_H + C_R + E_s)) * C$$

2.2.3. Precast Segmental Box Girder

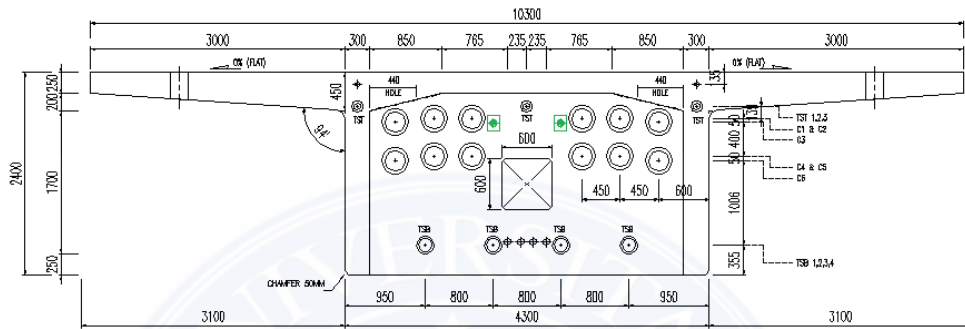
Precast segmental box girder adalah salah satu perkembangan penting dalam teknik jembatan yang tergolong baru dalam beberapa tahun terakhir. Berbeda dengan sistem konstruksi monolit, sebuah jembatan segmental *box girder* terdiri dari elemen-elemen pracetak yang diprategang bersama-sama oleh tendon eksternal (Prof. Dr.-Ing. G. Rombach, 2002).

2.2.4. Elemen Struktural Jembatan Segmental Box Girder

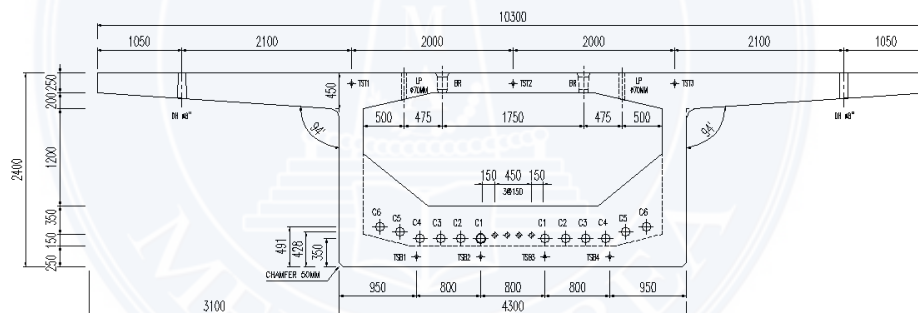
Jembatan segmental seharusnya dibangun seperti struktur bentang tunggal untuk menghindari adanya sambungan kabel *post-tension*. Sehubungan dengan adanya eksternal *post-tension* maka diperlukan tiga macam segmen yang berbeda, diantaranya (Prof. Dr.-Ing. G. Rombach, 2002):

- *Expansion Joint Segment* : Bagian ini terletak tepat diatas abutment.
- *Deviator segment* : Bagian ini dibutuhkan untuk pengaturan deviasi tendon.
- *Standard segment* : Dimensi standard box girder yang digunakan.

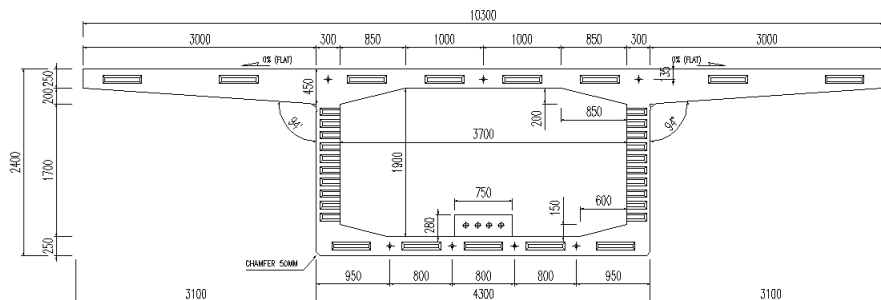
Expansion Joint Segment



Deviator segment



Standard segment



Gambar 2.7 Tipe Precast Box Girder Jalan Layang Kereta Api Kualanamu

BAB III

ANALISA STRUKTUR BOX GIRDER

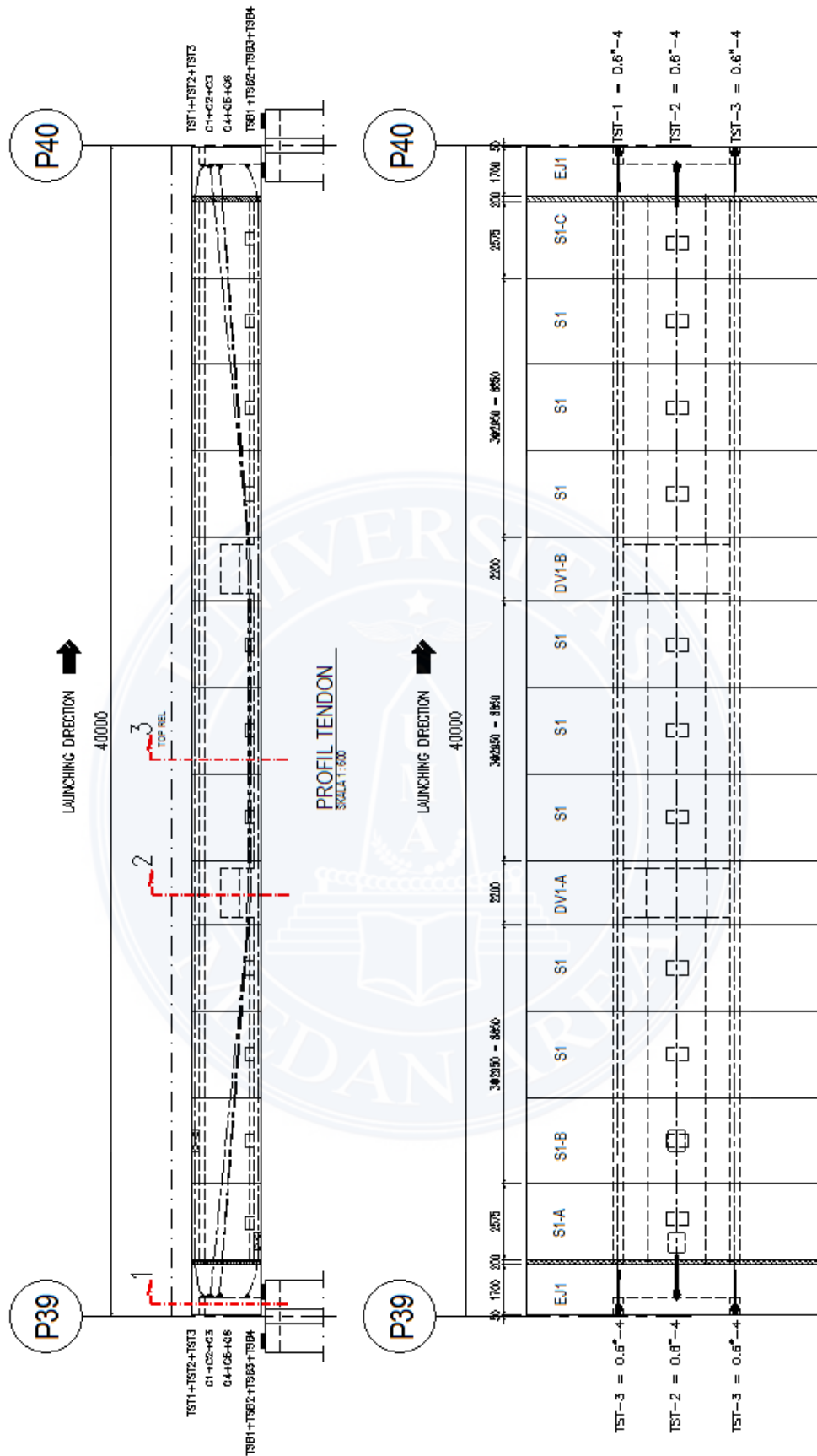
3.1. Umum

Pada jalan layang Stasiun Medan-Stasiun Bandara Kualanamu bentang yang dianalisa adalah bentang Pier 39 – Pier 40 dengan panjang balok $L = 40$ m. Dalam disain prategang, digunakan baja prategang kabel strand dengan diameter 12,7 mm untuk internal tendon dipasang lurus disepanjang bentang dan eksternal tendon dipasang parabolis.

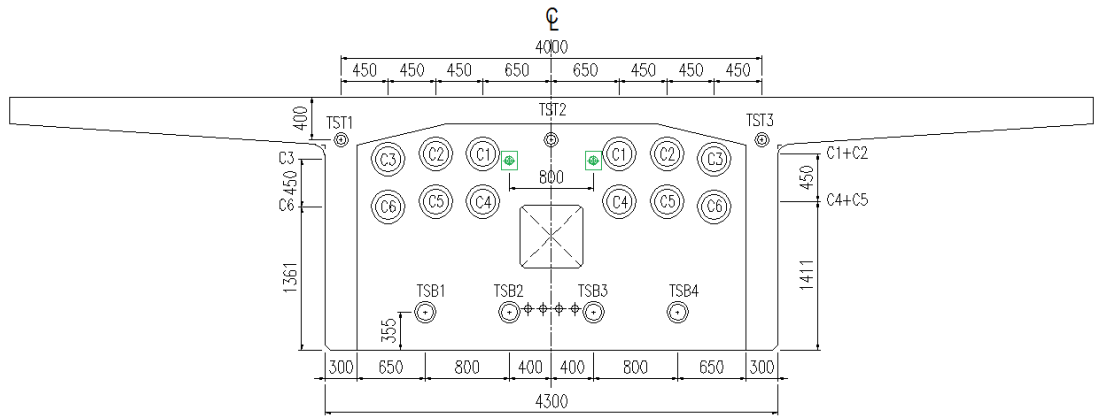
Segmen girder jalan layang Stasiun Medan-Stasiun Bandara Kualanamu berbentuk box dengan material beton mutu $K-500 \text{ kg/cm}^2$ yang dikompositkan dengan ballast serta banjalan jalan rel dengan mutu beton $K-350 \text{ kg/cm}^2$.

Susunan tendon berpasangan dan sejajar. Setiap baris tendon memiliki trase yang berbeda – beda. Hal ini menyebabkan ada salah satu dari bentuk kurva mendekati garis lurus. Trase tendon yang mendekati garis lurus ini diperlukan untuk menentukan baris mana yang terlebih dahulu diberi gaya prategang.

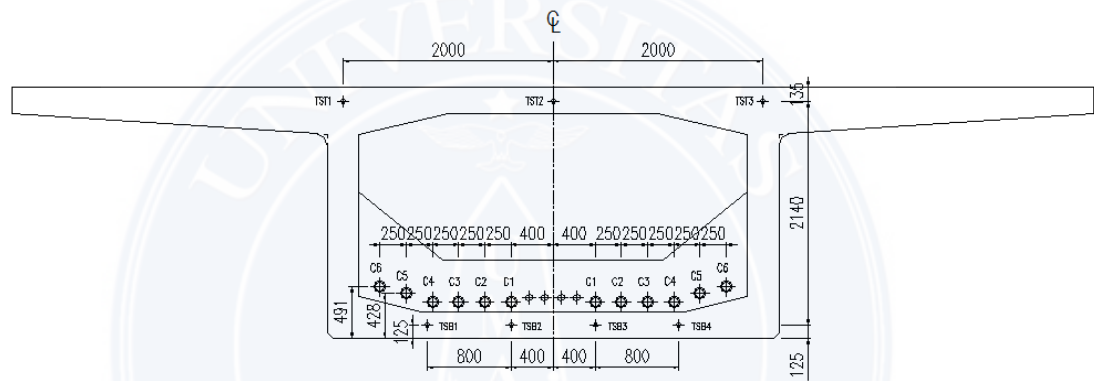
Profil tendon ditumpuan antara tidak dapat mempunyai konfigurasi puncak yang sama seperti diagram momen negative, karena tinjau desian dan tinjauan praktis. Kedua tinjau tersebut meliputi besarnya kehilangan friksional yang membesar dengan berkurangnya jari – jari kelengkungannya, tingginya taraf pemutusan tegangan dalam kasus perubahan mendadak pada tendon, dan tambahan kesulitan yang timbul pada pemberian pascatarik.



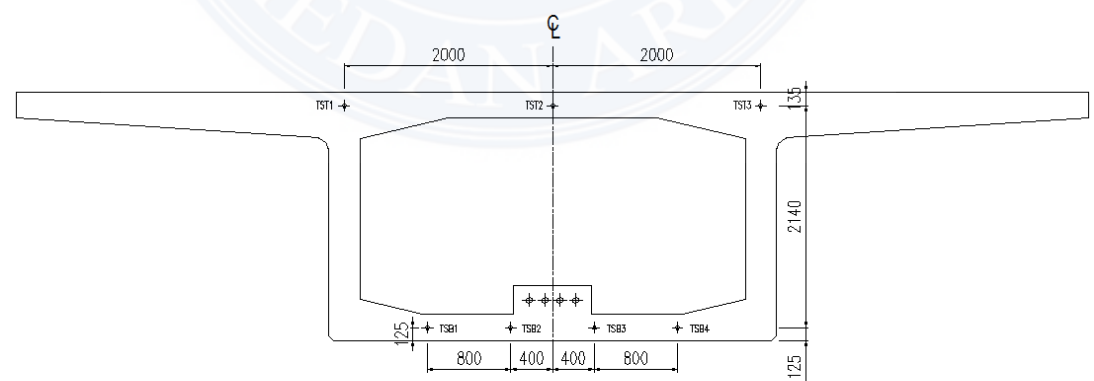
Gambar 3.1 Konfigurasi Tendon Prategang P39 – P40



POTONGAN - 1
SKALA 1 : 50



POTONGAN - 2
SKALA 1 : 50



POTONGAN - 3
SKALA 1 : 50

Gambar 3.2 Potongan melintang segmen box girder P39 – P40

3.2. Precast Concrete Box Girder

Melalui proses perencanaan segmen balok jalan layang Stasiun Medan-Stasiun Bandara Kualanamudengan penampang box dianggap mampu menerima beban struktur dan lebih ekonomis. Balok precast tersebut diproduksi oleh PT. Wijaya Karya Beton, Tbk sesuai spesifikasi yang dibuat oleh konsultan perencana.

Berikut merupakan langkah – langkah proses produksi precast concrete box girder :

1. Menyiapkan data shop drawing dan geometry control yang telah disetujui oleh pihak konsultan dan pemilik proyek.
2. Rakit tulangan pada rebar cage serta pasang spacer dan aksesoris sesuai gambar kerja



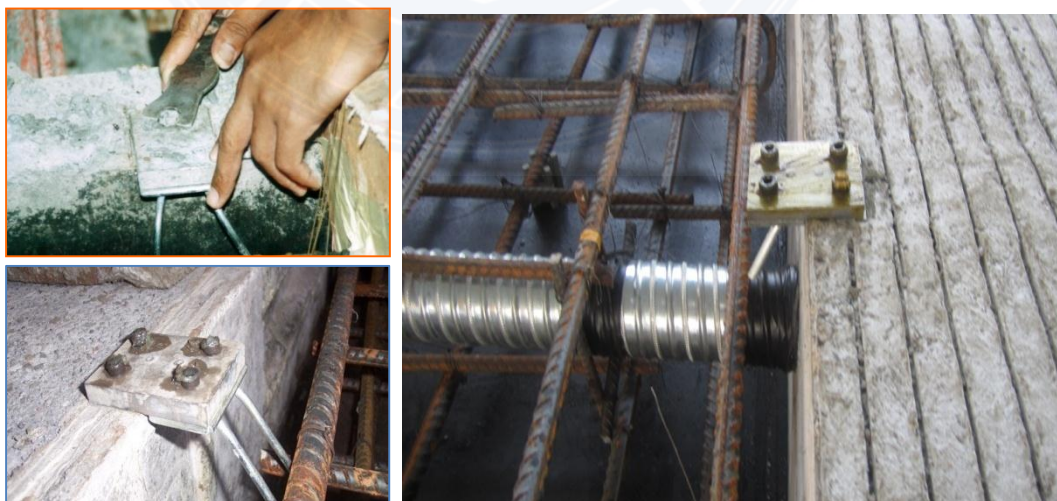
Gambar 3.3 Rakitan Tulangan Box Girder Pada Rebar Cage

3. Setting ketegakan dan kelurusannya cetakan dengan panduan dari surveyor, dengan cara mengoperasikan hidrolik vertikal pada geometri cart, yang sesuai nilai koordinat lokal rencana.



Gambar 3.4 Setting Ketegakkan Cetakan Box Girder Oleh Surveyor

4. Oleskan minyak cetak pada permukaan basah cetakan secara tipis dan merata.
5. Pasang control point pada titik – titik yang telah ditentukan sesuai data koordinat elevasi. Lakukan pengecekan akhir oleh surveyor untuk memastikan elevasi sudah sesuai.



Gambar 3.5 Pemasangan Control Point Sebagai Acuan Untuk Menentukan Elevasi Box Girder

6. Lakukan pengecoran dengan menuangkan adukan beton ke cetakan secara bertahap dimulai dari bottom slab sampai bagian atas cetakan.



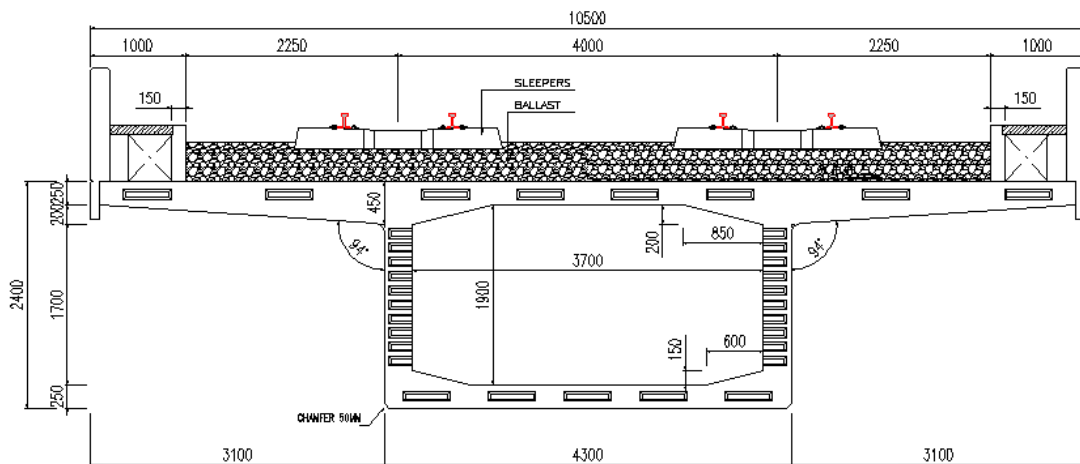
Gambar 3.6 Pekerjaan Pengecoran Segmen Box Girder

7. Keluarkan produk dari cetakan setelah hasil pengecoran terakhir cukup umur yang disyaratkan ($\geq 50\%$ mutu rencana).
8. Pada saat penumpukan produk, pastikan produk yang akan menumpuk tidak lebih berat / besar daripada produk dibawahnya.

3.3. Perencanaan Struktur Atas

Adapun data – data yang diperoleh dari bentuk penampang seperti yang ditunjukkan Gambar 3.3, untuk dapat mengetahui apakah penampang tersebut memenuhi persyaratan lentur yang meliputi tegangan beton dan tegangan baja.

1. Data Perencanaan



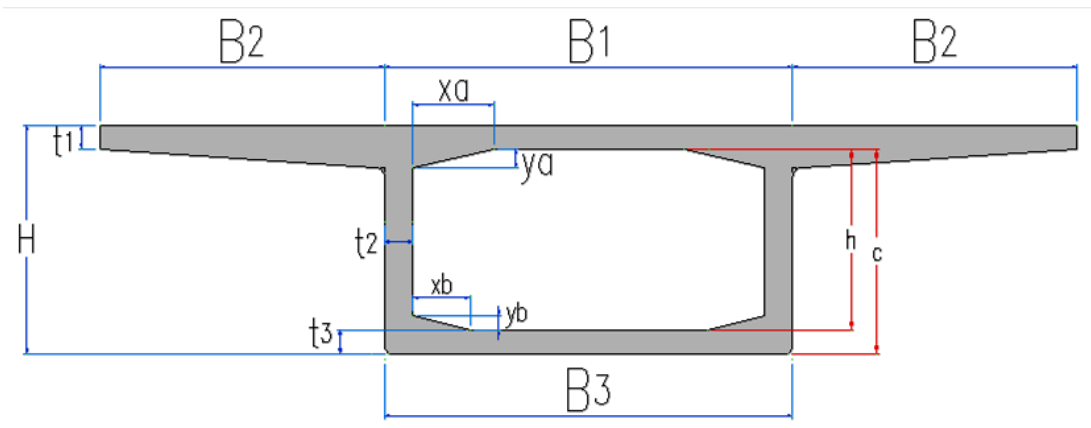
Gambar 3.7 Potongan Melintang Segmen Box Girder P39 – P40 Serta Komponen Struktur Atas

- Fungsi jalan : Rel kereta double track
- Tipe jembatan : Precast segmental box girder dengan menggunakan struktur beton pratekan tipe single box.
- Panjang jembatan : 39.90 m, Pier 39 – Pier 40 terdiri dari 1 bentang
- Lebar jembatan : 10,5 m
- Lebar jalur lalu lintas (B): 8.5 m
- Jumlah Rel : 4 bh, 2 lajur 2arah.
- Jumlah bantalan dalam 1 span : 134 bh
- Tebal ballast : 42,3 cm

2. Data Bahan

- Kuat tekan beton prategang (f_c') : 40 Mpa
- Kuat tekan beton untuk struktur sekunder (f_c') : 28 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.

Potongan melintang tengah bentang



Gambar 3.8 Dimensi Penampang Box Girder

Tabel 3.1 Penempatan Tebal Pelat Pada Penampang Segmen Box Girder

Slab atas bag. Tengah.	$B_1 =$	4.30m
	$t_1 =$	0.25m
Slab atas bag. Tepi.	$B_2 =$	3.00m
	$t_1 =$	0.25m
Tinggi box girder.	$H =$	2.40m
Dinding tengah.	$t_2 =$	0.30m
Slab bawah.	$B_1 =$	4.30m
	$t_3 =$	0.25m

Penebalan pada pertemuan slab dan dinding		
$x_a =$	0.85	m
$y_a =$	0.20	m
$x_b =$	0.60	m
$y_b =$	0.15	m

Lebar total box,

$B_{tot} = B_1 + 2*B_2 =$	10.30	m
$h = H - t_1 - t_3 =$	1.90	m
$c = h + t_3 =$	2.15	m

3.4. Material

a. Beton

Dari data dilampirkan diketahui :

a) Mutu beton box girder prestress = 500 kg/cm^2

b) Mutu beton Bantalan jalan rel = 350 kg/cm^2

Kuat tekan box girder prestress,

$$f_c' = 0.83 * K / 10 = 41.50 \text{MPa}$$

Modulus elastik balok beton prestress,

$$E_c = 0.043 * (w_c)^{1.5} * \sqrt{f_c'} = 3.57 \text{kPa}$$

Kuat tekan beton pada keadaan awal (saat transfer),

$$f_{ci}' = 0.80 * f_c' = 33.20 \text{MPa}$$

Tegangan ijin beton saat penarikan :

$$\text{Tegangan ijin tekan} = 0.55 * f_{ci}' = 18.26 \text{MPa}$$

$$\text{Tegangan ijin tekan} = 0.4 * f_c' = 16.60 \text{MPa}$$

Tegangan ijin beton keadaan akhir :

$$\text{Tegangan ijin tekan} = 0.4 * f_c' = 16.60 \text{MPa}$$

$$\text{Tegangan ijin tarik} = 0.60 * \sqrt{f_c'} = 3.87 \text{MPa}$$

b. Baja prategang

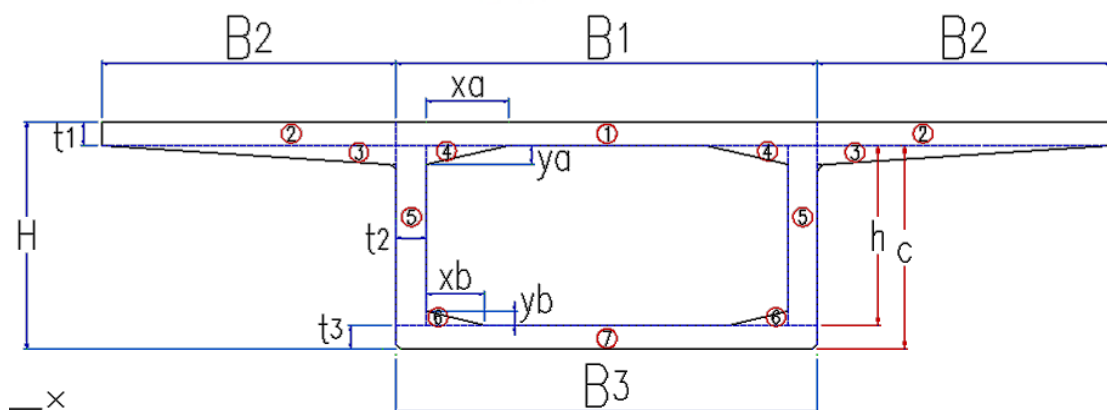
- Jenis strands : Uncoated 7 wire super strand ASTM A-416 grade 270

- Tegangan leleh strand (f_{py}) = 1580000 kPa
- Kuat tarik strands (f_{pu}) = 1860000 kPa
- Diameter nominal strand (dia.) = 0.0127 m (1/2")
- Luas tampang nominal satu strand (A_{st}) = 0.00010 m²
- Beban putus minimal satu strand (P_{bs}) = 187.32 kN (100% UTS atau 100% beban putus)
- Jumlah kawat untaian (strands cable) = 60 kawat untaian
- Diameter selubung ideal = 65 mm
- Luas tampang strand = 0.00188m²
- Beban putus satu tendon (P_{bl}) = 3746.4 kN
- Modulus elastis strands (E_s) = 1.9305 kPa

c. Tulangan

- Diameter (dia.) : 13 mm
- Luas tampang (A_{st}) = 1.267cm²
- Modulus elastis strands (E_s) = 2.1000kPa
- Tegangan leleh (f_y) = 3900 kg/cm²

3.4.1. Analisa Penampang



Gambar 3.9 Cross Section Box Girder Ditengah Bentang

Tabel 3.2 Momen Inersia Penampang Segmen Box Girder

NO	DIMENSI		Shape factor	Jumlah Tampang	Luas Tampang A m ²	Jarak thd alas y m	Statis Momen A * y m ³	Inersia Momen A * y ² m ⁴	Inersia Momen I _o m ⁴
	Lebar (m)	Tebal (m)							
1	4.30	0.25	1.0	1	1.075	2.28	2.446	5.56	0.00560
2	3.00	0.25	1.0	2	1.5	2.28	3.413	7.76	0.00781
3	3.00	0.20	0.5	2	0.6	2.08	1.250	2.60	0.00133
4	0.85	0.20	0.5	2	0.17	2.08	0.354	0.74	0.00038
5	0.30	1.90	1.0	2	1.14	1.20	1.368	1.64	0.34295
6	0.60	0.15	0.5	2	0.09	0.30	0.027	0.01	0.00011
7	4.30	0.25	1.0	1	1.075	0.13	0.134	0.02	0.00560
					5.65		8.992	18.34	0.36

Tinggi box girder pre-stress(H) =2.40m

Luas penampang box girder pre-stress (A) =5.65 m

Letak titik berat

$$\begin{aligned}
 (y_b) &= \sum A*y / \sum A \\
 &= 8.99 / 5.65 \\
 &= 1.59 \text{ m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (y_a) &= h - y_b \\
 &= 2.40 / 1.59 \\
 &= 0.81 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Momen inersia terhadap alas balok

$$\begin{aligned}
 I_b &= \sum A*y^2 + \sum I_o \\
 &= 18.34 + 0.36 \\
 &= 18.70\text{m}^4
 \end{aligned}$$

Momen inersia terhadap titik berat balok

$$\begin{aligned} I_x &= I_b - A * y_b^2 \\ &= 18.70 - 5.65 * 1.59^2 \\ &= 4.40 \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Tahanan momen sisi atas

$$\begin{aligned} W_a &= I_x / y_a \\ &= 4.40 / 0.81 \\ &= 5.43 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Tahanan momen sisi bawah

$$\begin{aligned} W_b &= I_x / y_b \\ &= 4.40 / 1.59 \\ &= 2.76 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Berat beton prestress, (W_c) = 25.50 kN/m³

Panjang bentang box girder, (L) = 39.90 m

Gaya geser maksimum di tumpuan

$$\begin{aligned} V_{bs} &= 1/2 * Q_{bs} * L \\ &= 1/2 * 144.08 * 39.90 \\ &= 2874.30 \text{ kN} \end{aligned}$$

3.5. Pembebanan Box Girder Prestress

3.5.1. Beban Mati

Precast Girder = Ac slab x Conc Weight

$$= 5.65\text{m}^2 \times 2.5 \text{ t/m}^3$$

$$= 14.13\text{t/m'}$$

$$= 138.52 \text{ kN/m'}$$

3.5.2. Beban Mati Non Komposit

Ballast = Ac Ballast x Ballast Weight

$$= 3.60 \text{ m}^2 \times 2.7 \text{ t/m}^3$$

$$= 9.71 \text{ t/m'}$$

$$= 95.21\text{kN/m'}$$

Joint Grout = A grouting x Grouting Weight

$$= 3.60\text{m}^2 \times 2.5 \text{ t/m}^3$$

$$= 8.9987\text{t/m'}$$

$$= 88.15\text{kN/m'}$$

Rail (R54) = 4 pcs rail x rail weight

$$= 4 \text{ pcs} \times 54 \text{ kg/m}$$

$$= 0.216 \text{ t/m'}$$

$$= 2.12 \text{ kN/m'}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Sleepers} &= \text{Quantity} \times \text{sleeper weight} \\
 &= 134 \text{ pcs} \times 200 \text{ kg} \\
 &= 26.8 \text{ t} \\
 &= 6.59 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

3.5.3. Berat Sendiri

$$\begin{aligned}
 \text{Berat sendiri box girder prestress (Q}_{bs}) &= A * W_c \\
 &= 5.65 * 25.50 \\
 &= 144.08 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat sendiri (Q}_{MS}) &= \text{beban precast girder} + \text{ballast} + \text{joint grout} + \text{sleepers} \\
 &= 138.52 + 95.21 + 88.15 + 6.59 \\
 &= 328.47 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat tambahan (Q}_{MA}) &= \text{joint grout} \\
 &= 88.15 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Berat tambahan (Q}_{TD}) &= (8 * (0.5 + 15 / L)) * (B + 5.5) / 2 \\
 &= (8 * (0.5 + 15 / 39.90)) * (8.5 + 5.5) / 2 \\
 &= 49.05 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

3.6. Gaya Prestress, Eksentrisitas, Dan Jumlah Tendon

3.6.1. Kondisi Awal (Saat Transfer)

Mutu betonbox girder prestress(K) = 500 kg/cm²

Kuat tekan beton,

$$f_c' = 0.83 * K * 100$$

$$= 0.83 * 500 * 100$$

$$= 41500\text{kPa}$$

Kuat tekan beton pada keadaan awal (saat transfer),

$$f_{ci}' = 0.83 * f_c'$$

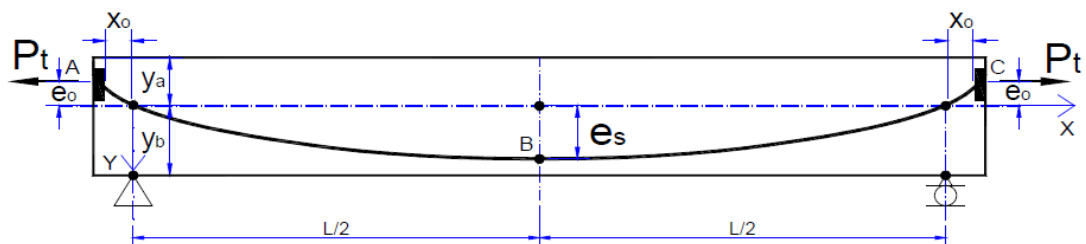
$$= 0.83 * 41500$$

$$= 34445\text{kPa}$$

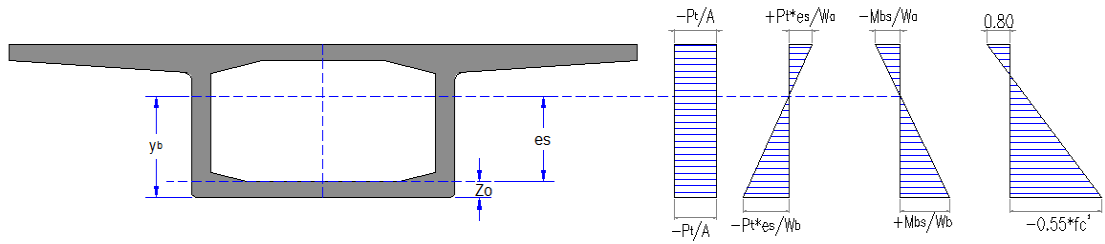
Section properties, Tahanan Momen Sisi Atas (W_a) = 5.43 m³

Tahanan Momen Sisi Bawah (W_b) = 2.76 m³

Luas Penampang (A) = 5.650m²



Gambar 3.10 Elevasi Balok Prategang



Gambar 3.11 Penampang dan Tegangan Lentur

Letak titik berat box girder terhadap sisi bawah, (y_b) = 1.591 m

Ditetapkan jarak pusat berat tendon terhadap sisi bawah box girder, (z_o) = 0.125m

Eksentrisitas tendon,

$$\begin{aligned}
 e_s &= y_b - z_o \\
 &= 1.591 - 0.125 \\
 &= 1.47\text{m}
 \end{aligned}$$

Momen akibat berat sendiri

$$\begin{aligned}
 M_{bs} &= 1/8 * Q_{bs} * L^2 \\
 &= 1/8 * 144.08 * 35.90^2 \\
 &= 8832.38 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Tegangan di serat atas,

$$0.80 * \sqrt{f_{ci}} = - P_t / A + P_t * e_s / W_a - M_{bs} / W_a \quad \dots\dots\dots(\text{persamaan 1})$$

$$-0.55 * \sqrt{f_{ci}} = - P_t / A - P_t * e_s / W_b - M_{bs} / W_b \quad \dots\dots\dots(\text{persamaan 2})$$

Besarnya gaya prategang awal ditentukan sebagai berikut :

$$\text{Dari pers (1) : } P_t = (0.80 * \sqrt{f_{ci}} + M_{bs} / W_a) / (e_s / W_a - 1 / A)$$

$$= (0.80 * \sqrt{34445} + 8832.38 / 5.43) / (1.47 / 5.43 - 1 / 5.650)$$

$$= 19066.08\text{kN}$$

Dari pers (2) : $P_t = (-0.55 \cdot \sqrt{f_{ci} + M_{bs} / W_b }) / (e_s / W_b - 1 / A) = 9775.04 \text{ kN}$

$$= (0.80 \cdot \sqrt{34445 + 8832.38 / 2.76}) / (1.47 / 2.76 - 1 / 5.650)$$

$$= 8741.02 \text{ kN}$$

Dari persamaan 1, dan 2, diambil gaya prategang awal $P_t = 8741.02 \text{ kN}$

Digunakan kabel yang terdiri dari beberapa kawat baja untaian "Strand cable",

dengan data sbb. :

- Jenis strands Uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270
- Diameter nominal strands 0.0127 m
- Luas tampang nominal satu strands (A_{st}) = 0.0001 m²
- Beban putus minimal satu strands (P_{bs}) = 187.32 kN (100% UTS atau 100% beban putus)

Jumlah strand minimal yang diperlukan,

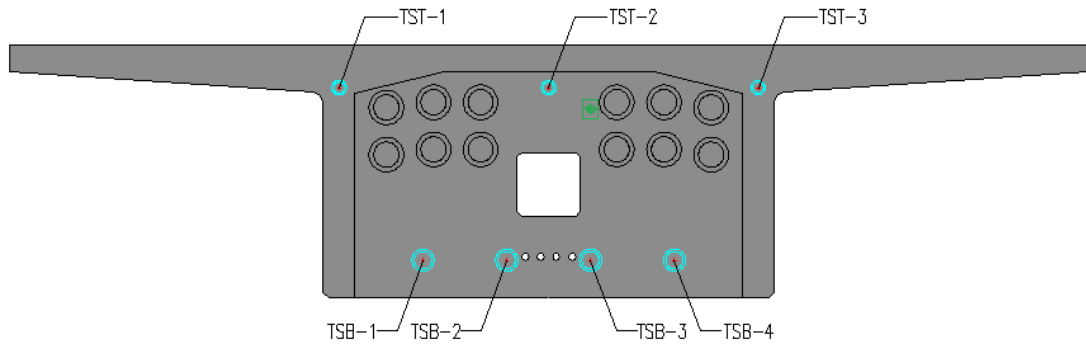
$$n_s = P_t / (0.8 \cdot P_{bs})$$

$$= 8741.02 / (0.8 \cdot 187.32)$$

$$= 58 \text{ strand}$$

Total jumlah strand yang diambil sebanyak 60 untaian.

Jumlah strand 60 untaian, dibagi pada tiap - tiap tendon sisi atas dan sisi bawah segmen, seperti yang terlihat pada tabel 3.3.



Gambar 3.12 Posisi Tendon Internal Pada Penampang Segmen Tumpuan

Gambar 3.3 Tabel Pembagian Tendon Internal

INTERNAL TENDON			
PELAT ATAS :		PELAT BAWAH :	
NO. CABLE	NO. PC STRAND DIA. 12,7mm	NO. CABLE	NO. PC STRAND DIA. 12,7mm
TST-1	4	TSB-1	12
TST-2	4	TSB-2	12
TST-3	4	TSB-3	12
total	12	TSB-4	12
		total	48

Digunakan jumlah strands sebagai berikut :

Tabel 3.4 Jumlah Internal Tendon Serta Segmen Box Girder

n_{s1}	3	Tendon	12	strands / tendon =	12	Strands dg. selubung tendon	65 mm
	4	Tendon	12	strands / tendon =	48	Strands dg. selubung tendon	65 mm
n_t	7	Tendon	Jumlah strands,	n_s =	60	Strands	

Beban Putus Strand Total :

$$\begin{aligned}
 P_{bs1} &= P_t / n_s \\
 &= 8741.02 / 60 \\
 &= 145.68 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Persentase tegangan leleh yang timbul pada baja (% Jacking Force) :

1. Gaya pada tendon di ujung dongkrak (jacking force) :

$$\begin{aligned} p_o &= P_t / (n_s * P_{bs1}) \\ &= 8741.02 / (60 * 145.68) \\ &= 1.00 \end{aligned}$$

2. Gaya prestress akibat jacking (jacking force) :

$$\begin{aligned} p_j &= P_o * n_s * P_{bs1} \\ &= 1.00 * 60 * 145.68 \\ &= 8497.6 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Besar Ultimate Tensile Strength (UTS)} &= p_j / (n_s * 1.387 * P_{bs}) \\ &= 8497.6 / (60 * 1.387 * 187.32) \\ &= 68.17\% \end{aligned}$$

3.6.2. Kondisi Akhir (Saat Service)

Diperkirakan kehilangan tegangan (loss of prestress) = 30%

Gaya prestress akhir setelah kehilangan tegangan (loss of prestress) sebesar 30% :

$$\begin{aligned} P_{\text{eff}} &= 70\% * P_j \\ &= 70\% * 8497.6 \\ &= 5948.35 \text{ kN} \end{aligned}$$

Mutu beton K-500, Kuat tekan beton :

$$f_c' = 0.83 * K * 100$$

$$= 0.83 * 500 * 100$$

$$= 41500 \text{ kPa}$$

Momen – momen yang terjadi :

$$\text{Momen maksimum akibat berat sendiri (M}_{MS}) = 1/8 * Q_{MS} * L^2$$

$$= 1/8 * 328.47 * 39.90^2$$

$$= 67190.6 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen maksimum akibat berat sendiri (M}_{TD}) = 1/8 * Q_{TD} * L^2$$

$$= 1/8 * 49.05 * 39.90^2$$

$$= 9761.01 \text{ kNm}$$

$$\text{Momen maksimum akibat beban mati tambahan (M}_{MA}) = 1/8 * Q_{MA} * L^2$$

$$= 1/8 * 88.15 * 39.90^2$$

$$= 17541.96 \text{ kNm}$$

Section properties, Tahanan momen sisi atas (W_a) = 5.43 m³

Tahanan momen sisi bawah (W_b) = 2.76 m³

Luas penampang box girder pre-stress (A) = 5.65 m²

Tegangan di serat atas,

$$-0.45 * f_c' = - P_{eff} / A + P_{eff} * e_s / W_a - M_{bs} / W_a - M_{TD} / W_a \dots\dots\dots(\text{persamaan 3})$$

$$0.50 * \sqrt{f_c'} = - P_{eff} / A + P_{eff} * e_s / W_b - M_{bs} / W_a - M_{TD} / W_b \dots\dots\dots(\text{persamaan 4})$$

Dari pers (3) : $P_{\text{eff}} = [-0.45 \cdot f_c' + (M_{\text{bs}} + M_{\text{TD}}) / W_a] / (e_s / W_a - 1 / A)$

$$= [-0.45 \cdot 41500 + (8832.38 + 9761.01) / 5.43] / (1.47 / 5.43 - 1 / 5.65)$$

$$= -163781.43 \text{ kN}$$

Dari pers (4) : $P_{\text{eff}} = [0.50 \cdot \sqrt{f_c'} + (M_{\text{bs}} + M_{\text{TD}}) / W_b] / (e_s / W_b - 1 / A)$

$$= [-0.45 \cdot 41500 + (8832.38 + 9761.01) / 2.76] / (1.47 / 2.76 - 1 / 5.65)$$

$$= 19294.19 \text{ kN}$$

Dari persamaan 3 dan 4, diambil gaya prategang efektif $P_{\text{eff}} = 19294.19 \text{ kN}$

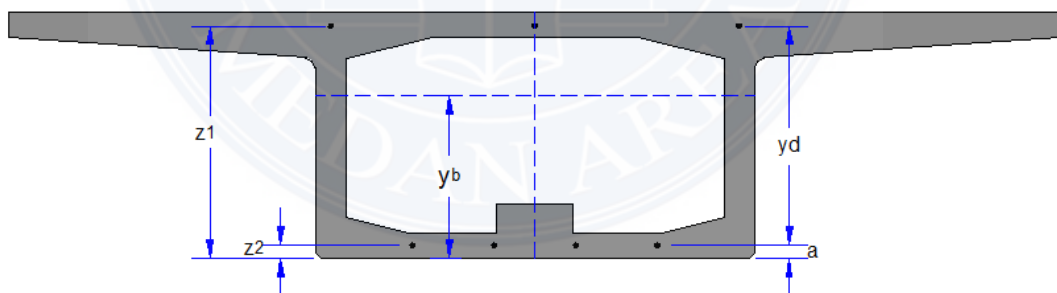
Besar Ultimate Tensile Strength (UTS) = $P_{\text{eff}} / (n_s \cdot 1.387 \cdot P_{\text{bs}})$

$$= 19294.19 / (60 \cdot 1.387 \cdot 187.32)$$

$$= 123.77\%$$

3.6.3. Posisi Tendon

a. Posisi Tendon Di Tengah Bentang



Gambar 3.13 Posisi Tendon Internal Di Tengah Bentang

Ditetapkan, $a = 0.125 \text{ m}$

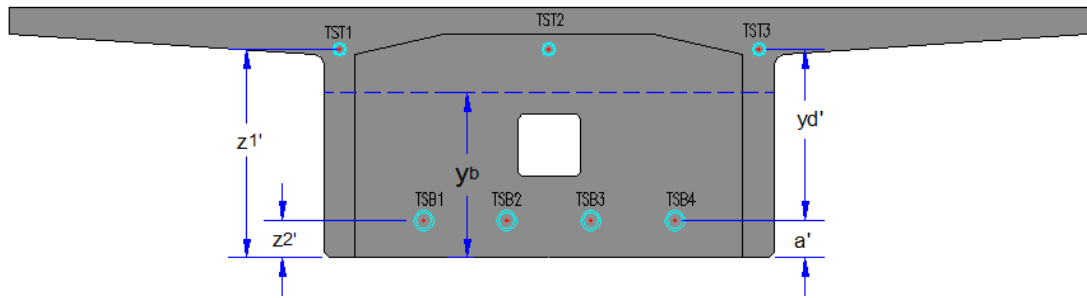
$$y_d = z_o - a = 2.14 \text{ m}$$

Jarak masing - masing baris tendon terhadap alas

$$z_1 = a + y_d = 2.265 \text{ m}$$

$$z_2 = a = 0.125 \text{ m}$$

b. Posisi Tendon Di Tumpuan



Gambar 3.14 Posisi Tendon Internal Di Tumpuan

Ditetapkan, $y_d' = 1.645\text{m}$

$a' = 0.355\text{m}$

Jarak masing - masing baris tendon terhadap alas :

$$z_1' = a' + y_d' = 2.00\text{m}$$

$$z_2' = a' = 0.355\text{m}$$

Tabel 3.5 Eksentrisitas Masing – Masing Tendon

Baris Tendon	Posisi Tendon di Tumpuan $x = 0.00\text{ m}$	z_i' (m)	Baris Tendon	Posisi Tendon di Tengah Bentang $x = 20.00\text{ m}$	z_i (m)	Baris Tendon	$f_i = z_i' - z_i$ (m)
1	$z_1' = a' + y_d'$	2.000	1	$z_1 = a + y_d$	2.265	1	-0.265
2	$z_2' = a'$	0.355	2	$z_2 = a$	0.125	2	0.230

c. Sudut Angkur

Persamaan lintasan tendon, $Y = 4 * f_i * X / L_2 * (L - X)$

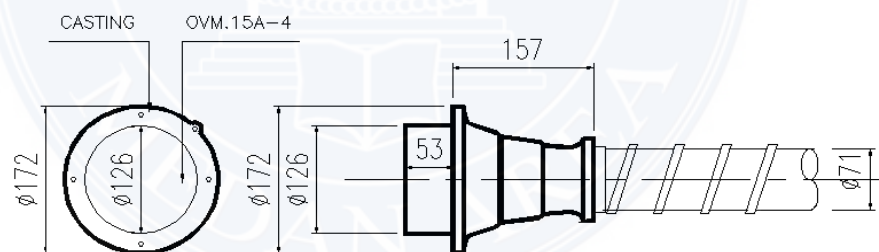
$$dY/dX = 4 * f_i * (L - 2*X) / L^2$$

Untuk $X = 0$ (posisi angkur di tumpuan), maka $dY/dX = 4 * f_i / L$

Persamaan sudut angkur, $a = \text{ATAN} (dY/dX)$

Tabel 3.6 Sudut Angkur Tendon Internal

NO TENDON	JUMLAH STRAND	DIAMETER SELUBUNG	Eksentrisitas	f_i (m)	dY/dX	SUDUT ANGKUR	
1	12	65	f_1	-0.265	-0.02657	$a_1 = -0.03$	rad = -1.5°
2	48	65	f_2	0.230	0.02306	$a_2 = 0.02$	rad = 1.3°



Gambar 3.15 Detail Casting Internal Tendon

d. Tata Letak Dan Trace Kabel

Panjang bentang box girder (L) = 39.90m

Eksentrisitas (f_0) = e_s = 1.47 m

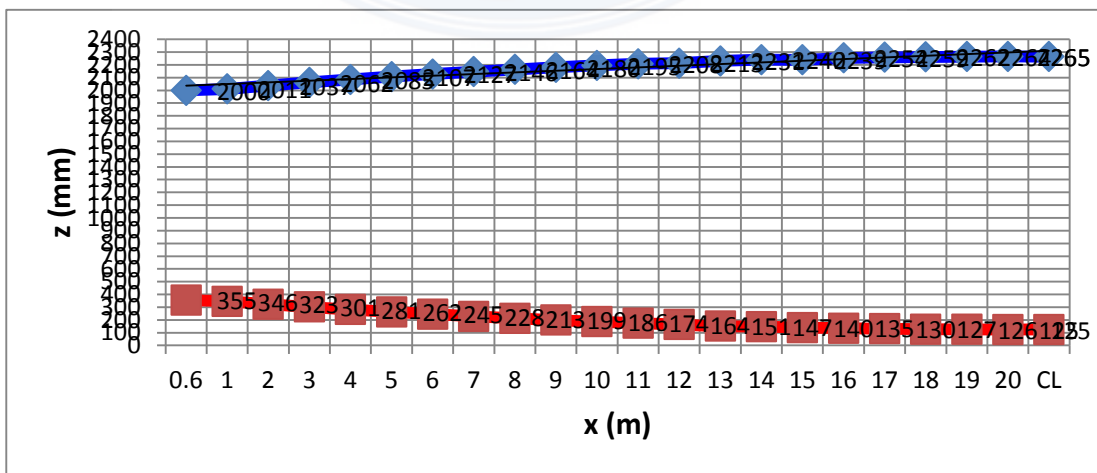
Jarak titik berat elemen ke sumbu y (y_b) = 1.591m

Eksentrisitas tendon sisi atas (f_1) = -0.265 m

Eksentrisitas tendon sisi bawah (f_2) = 0.230 m

Tabel 3.7 Koordinat Internal Tendon

Jarak X (m)	Posisi baris tendon	
	z ₁ (mm)	z ₂ (mm)
0.6	2000	355
1	2011	346
2	2037	323
3	2062	301
4	2085	281
5	2107	262
6	2127	245
7	2146	228
8	2164	213
9	2180	199
10	2195	186
11	2208	174
12	2213	164
13	2231	151
14	2240	147
15	2239	140
16	2254	135
17	2259	130
18	2262	127
19	2264	126
20	2265	125
CL	2265	125



Gambar 3.16 Trace Masing – Masing Tendon

3.7. Kehilangan Tegangan (Loss Of Prestress)

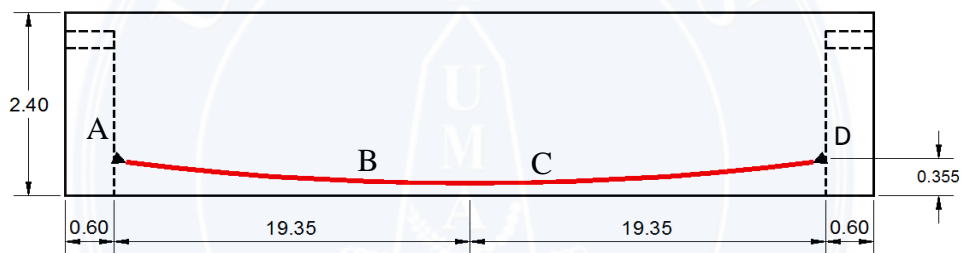
3.7.1. Kehilangan Tegangan Akibat Gesekan Angkur (Anchorage Friction)

Gaya prestress akibat jacking (jacking force) : $P_j = 8497.6 \text{ kN}$

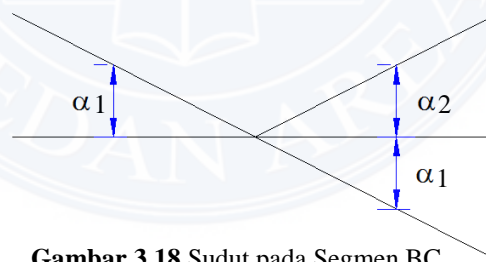
Kehilangan gaya akibat gesekan ankur diperhitungkan sebesar 3% dari gaya prestress akibat jacking.

$$\begin{aligned} P_o &= 97\% * P_j \\ &= 97\% * 8497.6 \\ &= 8242.72 \text{ kN} \end{aligned}$$

3.7.2. Kehilangan Tegangan Akibat Gesekan Cable (Jack Friction)



Gambar 3.17 Elevasi Internal Tendon Sisi Bawah



Gambar 3.18 Sudut pada Segmen BC

Segmen BC :

$$\alpha_1 = \frac{0.355}{19.35} = 0.018 = \alpha_2$$

Sudut lintasan tendon dari ujung ke tengah : $\alpha_1 = 0.018 \text{ rad}$

$$\alpha_2 = 0.018 \text{ rad}$$

Perubahan sudut total lintasan tendon, $\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 = 0.036$

Menurut ACI 318, nilai koefisien friksi(μ) untuk strand yang menggunakan selongsong besi yang mengkilap : $\mu = 0.20$

Sedangkan nilai koefisien wobble (β) diperoleh : $\beta = 0.003$

$P_o = 8242.72 \text{ kN}$

Loss of prestress akibat gesekan kabel : $P_x = P_o * e^{-\mu * (\alpha + \beta * L_x)}$

dengan, $e = 2.7183$ (bilangan natural)

$$\begin{aligned} \text{Untuk, } L_x = 19.95 \text{ m} \quad P_x &= P_o * e^{-\mu * (\alpha + \beta * L_x)} \\ &= 8242.72 * 2.7183^{-0.20 * (0.036 + 0.003 * 19.95)} \\ &= 8086.21 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Untuk, } L_x = 39.90 \text{ m} \quad P_x &= P_o * e^{-\mu * (\alpha + \beta * L_x)} \\ &= 8242.72 * 2.7183^{-0.20 * (0.036 + 0.003 * 39.90)} \\ &= 7989.99 \text{ kN} \end{aligned}$$

3.7.3. Kehilangan Tegangan Akibat Pemendekan Elastis (Elastic Shortening)

Jarak titik berat tendon baja terhadap titik berat box girder (e_s) = 1.4664m

Momen inersia tampang box girder (I_x) = 4.38978236m⁴

Luas tampang box girder (A) = 5.65000m²

Modulus elastis box girder (E_c) = 3.56699725kPa

Modulus elastis baja prestress strand (E_s) = 1.93053kPa

Jumlah total strand (n_s) = 60

Luas tampang nominal satu strand (A_{st}) = 0.0001m²

Beban putus strand (P_{bs}) = 187.32kN

Momen akibat berat sendiri box girder (M_{bs}) = 8832.38kNm

$$\begin{aligned} \text{Luas tampang tendon baja prestress } (A_t) &= n_s * A_{st} \\ &= 60 * 0.0001 \\ &= 0.00593 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Modulus ratio antara baja prestress dengan box girder (n)} &= E_s * E_c \\ &= 1.93053 * 3.567 \\ &= 5.412 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Jari-jari inersia penampang box girder (i)} &= \sqrt{(I_x / A)} \\ &= \sqrt{(4.38 / 5.65)} \\ &= 0.881\text{m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Konstanta tendon (K}_e\text{)} &= A_t / A * (1 + e_s^2 / i^2) \\ &= 0.00593 / 5.65 * (1 + 1.46^2 / 0.881^2) \\ &= 0.00395241 \end{aligned}$$

Tegangan baja pre-stress sebelum loss of prestress (di tengah bentang) :

$$\begin{aligned} \sigma_{pi} &= n_s * P_{bs} / A_t \\ &= 60 * 187.32 / 0.00593 \\ &= 1896335\text{kPa} \end{aligned}$$

Kehilangan tegangan pada baja oleh regangan elastik dengan memperhitungkan pengaruh berat sendiri :

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pe'} &= \sigma_{pi} * n * K_e / (1 + n * K_e) \\ &= 1896335 * 5.412 * 0.00395241 / (1 + 5.412 * 0.00395241) \\ &= 39715 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Tegangan beton pada level bajanya oleh pengaruh gaya prestress P_t :

$$\begin{aligned} \sigma_{bt'} &= \Delta\sigma_{pe'} / n - M_{balok} * e_s / I_x \\ &= 39715 / 5.412 - 8832.38 * 1.4664 / 4.39 \\ &= 4388\text{kPa} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{pe} &= 1/2 * n * \sigma_{bt} \\ &= 1/2 * 5.412 * 4388 \\ &= 11873\text{kPa} \end{aligned}$$

Loss of prestress akibat pemendekan elastis :

$$\begin{aligned}\Delta P_e &= \Delta \sigma_{pe} * A_t \\ &= 11873 * 0.00593 \\ &= 70.37 \text{ kN}\end{aligned}$$

Panjang tarik masuk (berkisar antara 2 - 7 mm) diambil 2 mm : $\Delta L = 0.002 \text{ m}$

Modulus elastis baja prestress (E_s) = 1.93 kPa

Luas tampang tendon baja prestress (A_t) = 0.01 m²

Loss of prestress akibat gesekan ankur (P_o) = 8242.72 kN

Loss of prestress akibat gesekan cable (P_x) = 8086.21 kN

Jarak dari ujung sampai tengah bentang (L_x) = 19.95 m

$$\begin{aligned}\text{Kemiringan diagram gaya : } m &= \tan \omega = (P_o - P_x) / L_x \\ &= (8242.72 - 8086.21) / 19.95 \\ &= 7.85 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Jarak pengaruh kritis slip ankur dari ujung :

$$\begin{aligned}L_{\max} &= \sqrt{(\Delta L * E_s * A_t / m)} \\ &= \sqrt{(0.002 * 1.93 * 0.01 / 7.85)} \\ &= 0.0017 \text{ m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Loss of prestress akibat ankur : } \Delta P &= 2 * L_{\max} * \tan \omega \\ &= 2 * 0.0017 * 7.85 \\ &= 0.027 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P'_{\max} &= P_o - \Delta P / 2 \\ &= 8242.72 - 0.027 / 2 \\ &= 8243 \text{ kN}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{\max} &= P'_{\max} - \Delta P_e \\ &= 8243 - 70.37 \\ &= 8172 \text{ kN}\end{aligned}$$

3.7.4. Kehilangan Tegangan Akibat Relaxation Of Tendon

a. Pengaruh Susut (Shrinkage)

$$\Delta \epsilon_{su} = \epsilon_b * k_b * k_e * k_p$$

ϵ_b = regangan dasar susut (basic shrinkage strain). Untuk kondisi kering udara dengan kelembaban < 50 %,

$$\epsilon_b = 0.0006$$

k_b = koefisien yang tergantung pada pemakaian air semen (water cement ratio) untuk beton mutu tinggi dengan factor: $k_b=0.905$

air semen, $w = 0.40$ Cement content = 4.5 kN/m^3

k_e = koefisien yang tergantung pada tebal teoritis (e_m) dengan factor : $k_e = 0.734$

Luas penampang balok, $A = 5.650 \text{ m}^2$

Keliling penampang box girder yang berhubungan dengan udara luar, $K=12.421 \text{ m}$

$$e_m = 2 * A / K$$

$$= 2 * 5.650 / 12.421$$

$$= 0.910 \text{ m}$$

k_p = koefisien yang tergantung pada luasan tulangan baja memanjang non pre-stress.

Presentase luas tulangan memanjang (ρ) terhadap luas tampang balok = 0.50%

$$k_p = 100 / (100 + 20 * \rho)$$

$$= 100 / (100 + 20 * 0.50\%)$$

$$= 0.909$$

$$\Delta \epsilon_{su} = \epsilon_b * k_b * k_e * k_p$$

$$= 0.0006 * 0.905 * 0.734 * 0.909$$

$$= 0.000362$$

Modulus elastis baja prestress strand (E_s) = 1.93 kPa

Tegangan susut : $\sigma_{sh} = \Delta \epsilon_{su} * E_s$

$$=(0.000362 * 100000000) * 1.93$$

$$=69948.718 \text{ kPa}$$

b. Pengaruh Rangkak (Creep)

P initial (keadaan saat transfer) di tengah bentang :

$$P_i = P_x - \Delta P_e$$

$$=8086.21 - 70.37$$

$$= 8015.84 \text{ kN}$$

$$P_i / (n_s * P_{bs}) = 8015.84 / (60 * 187.32)$$

$$= 71.32 \% \text{ UTS}$$

Momen akibat berat sendiri box girder (M_{bs}) = 8832.38 kNm

Modulus elastis box girder (E_c) = 3.567 kPa

Tahanan Momen Sisi Atas (W_a) = 5.43 m³

Tahanan Momen Sisi Bawah (W_b) = 2.76 m³

Jarak titik berat tendon baja terhadap titik berat box girder (e_s) = 1.4664 m

Luas tampang box girder (A) = 5.65 m²

Tegangan yang terjadi di serat atas :

$$f_a = - P_i / A + P_i * e_s / W_a - M_{balok} / W_a$$

$$= - 8015.84 / 5.65 + 8015.84 * 1.4664 / 5.43 - 8832.38 / 5.43$$

$$= -880.45 \text{ kPa}$$

Tegangan yang terjadi di serat bawah :

$$f_b = - P_i / A + P_i * e_s / W_b - M_{balok} / W_b$$

$$= - 8015.84 / 5.65 + 8015.84 * 1.4664 / 2.76 - 8832.38 / 2.76$$

$$= - 359.27 \text{ kPa}$$

,Regangan akibat creep,

$$\epsilon_{cr} = (f_c / E_{balok}) * k_b * k_c * k_d * k_e * k_{tn}$$

k_c = koefisien yang tergantung pada kelembaban udara, untuk perhitungan diambil kondisi kering dengan kelembaban udara < 50 %, diperoleh : $k_c = 3$

k_c = koefisien yang tergantung pada derajat pengerasan beton saat dibebani dan pada suhu rata - rata di sekelilingnya selama pengerasan beton. Karena grafik pada gambar 6.4 didasarkan pada temperatur 20° C, sedang temperature rata - rata di Indonesia umumnya lebih dari 20° C, maka perlu ada koreksi waktu pengerasan beton sebagai berikut :

Jumlah hari dimana pengerasan terjadi pada suhu rata-rata T, $t = 28$ hari

Temperatur udara rata - rata, $T = 27.5$ °C

Umur pengerasan beton terkoreksi saat dibebani, $t' = t * (T + 10) / 30$

$$= 28 * (27.5 + 10) / 30$$

$$= 35 \text{ hari}$$

Koefisien untuk penggunaan material semen digunakan semen normal tipe I diperoleh : $k_d = 0.938$

Koefisien yang tergantung pada waktu (k_{tn}) dimana pengerasan terjadi dan tebal teoritis (e_m) digunakan nilai = 0.2

Untuk, waktu pengerasan beton (t) = 28 hari $e_m = 0.641$ m

Tegangan pada beton akibat prategang (f_c) = $f_b = 359.27$ kPa

Regangan rangkai pada waktu :

$$\epsilon_{cr} = (f_c / E_{balok}) * k_b * k_c * k_d * k_e * k_{tn}$$

$$= (359.27/1.93) * 0.905 * 3 * 0.938 * 0.734 * 0.2$$

$$= 37.65 \text{ kPa}$$

Tegangan akibat Creep : $\sigma_{cr} = \epsilon_{cr} * E_s$

$$= 37.65 * 1.93$$

$$= 72.69 \text{ kPa}$$

Perubahan tegangan yang disesuaikan terhadap waktu : $\Delta\sigma_{sc} = \sigma_{cr} + \sigma_{sh}$

$$=72.69 + 69948.718$$

$$=70021.41 \text{ kPa}$$

Tegangan awal pada tendon : $\sigma_{pi} = P_i / A_t$

$$=8015.84 / 0.00593$$

$$=1352473.24 \text{ kPa}$$

Besar tegangan terhadap UTS = 71.32 % UTS

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

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

X = 2 m Jika : $\sigma_{pi} = 75\% \text{ UTS}$

Relaxasi setelah 1000 jam pada 70 % beban putus (UTS) : c = 2.50%

Nilai, X = 1.05 m

Tegangan akibat rangkai :

$$\sigma_r = X * c * (\sigma_{pi} - \Delta\sigma_{sc})$$

$$= 1.05 * 2.50 * (1352473.24 - 70021.41)$$

$$= 33648.06 \text{ kPa}$$

Loss of Prestress jangka panjang = $\Delta\sigma_{sc} + \sigma_r$

$$= 70021.41 + 33648.06$$

$$= 104290.34 \text{ kPa}$$

Perubahan gaya prategang : $\Delta P = (\Delta\sigma_{sc} + \sigma_r) * A_t$

$$= (70021.41 + 33648.06) * 0.00593$$

$$= 618.11 \text{ kN}$$

Gaya efektif di tengah bentang balok : $P_{eff} = P_i - \Delta P$

$$= 8015.84 - 618.11$$

$$= 7397.73 \text{ kN}$$

Kehilangan gaya prestress total,

$$(1 - P_{eff}/P_j) * 100 \% = (1 - 7397.73 / 8497.6) * 100 \%$$

$$= 12.94 \%$$

Kontrol tegangan pada tendon baja pasca tarik segera setelah penyaluran gaya prestress :

Tegangan ijin tendon baja pasca tarik :

$$0.70 * f_{pu} = 0.70 * 1860000$$

$$= 1302000 \text{ kPa}$$

Tegangan tarik tulangan prategang : $f_p = P_{\text{eff}} / A_t$

$$= 7397.73 / 0.00593$$

$$= 1248183 \text{ kPa}$$

Tabel 3.8 Rekapitulasi Kehilangan Gaya Prategang Yang Terjadi Pada Box Girder

Gaya	(kN)	% UTS	Loss of prestress
P_j	8497.6	54.51%	Anchorage friction
P_i	8015.44	71.32%	Relaxation of tendon
P_{eff}	7397.73	123.77%	
Loss of prestress =			12.94%

Kehilangan gaya prestress total yang diperoleh sebesar 12.94 % < 30 % cukup dekat dengan estimasi awal (kehilangan gaya pre-stress akhir).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan analisa baik secara teknis maupun non teknis ada beberapa kesimpulan yang diperoleh, antara lain :

1. Analisis mengenai perilaku dilakukan dengan mempertimbangkan ketidak- elastisan material dan beban batas (ultimate) yang bekerja.
2. Apabila gaya prategang bekerja tidak pada pusat penampang, tetapi eksentrisitas, maka ada tambahan tegangan akibat eksentrisitas tersebut.
3. Di dalam suatu sistem struktur beton prategang selalu terdapat kehilangan gaya prategang baik akibat sistem penegangan maupun akibat waktu. Kehilangan gaya prestress yang terjadi sebesar 12,94 %.
4. Letak dan bentuk bursting steel tendon internal harus menyesuaikan besarnya gaya tarik yang terjadi pada zona pengankuran dengan menggunakan diameter besi D13 jarak 50 mm.

5.2. Saran

Dari kesimpulan diatas penulis menyarankan beberapa hal, antara lain :

1. Untuk analisis awal, terutama dalam menentukan dimensi penampang dan level dari prategang jumlahkan tegangan yang terjadi pada daerah – daerah kritis.
2. Pengaturan posisi penegangan pada penampang akan memberikan keuntungan lebih.

DAFTAR PUSTAKA

- Budiadi, Andri. 2008. : Desain Praktis Beton Prategang. Andi, Yogyakarta.
- Ilham, Noer M. 2008. “Perhitungan Box Girder Beton Prestress Gejayan Fly Over Yogyakarta”.
- Lin, T.Y., dan Ned H.Burns. 1988. Desain Struktur Beton Prategang. Edisi ke 3. Jilid 1. Diterjemahkan oleh : Daniel Indrawan M.C.E. Erlangga, Jakarta.
- Masnul, Cut Retno. 2009. “Analisa Prestress (Post-Tension) Pada Precast Concrete U Girder (Studi Kasus Pada Jembatan Flyover Amplas)” Universitas Sumatera Utara, Medan.
- Nawy, Edward G. 2001. Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar. Edisi ke 3. Jilid 1. Diterjemahkan oleh : Bambang Suryoatmo. Erlangga, Jakarta.
- Rombach, Prof. Dr.-Ing. G. 2002. ”*Precast segmental box girder bridges with external prestressing: Design and Construction*”.
- Wijaya Karya Beton, PT. 2015. “Dokumentasi Produksi dan Shop Drawing Box Precast Pembangunan Jalan KA Layang Antara Medan – Araskabu – Kualanamu”, Binjai.

LAMPIRAN FOTO – FOTO SITUASI LAPANGAN



Proses Buka Produk Segmen Box Girder Dari Cetakan

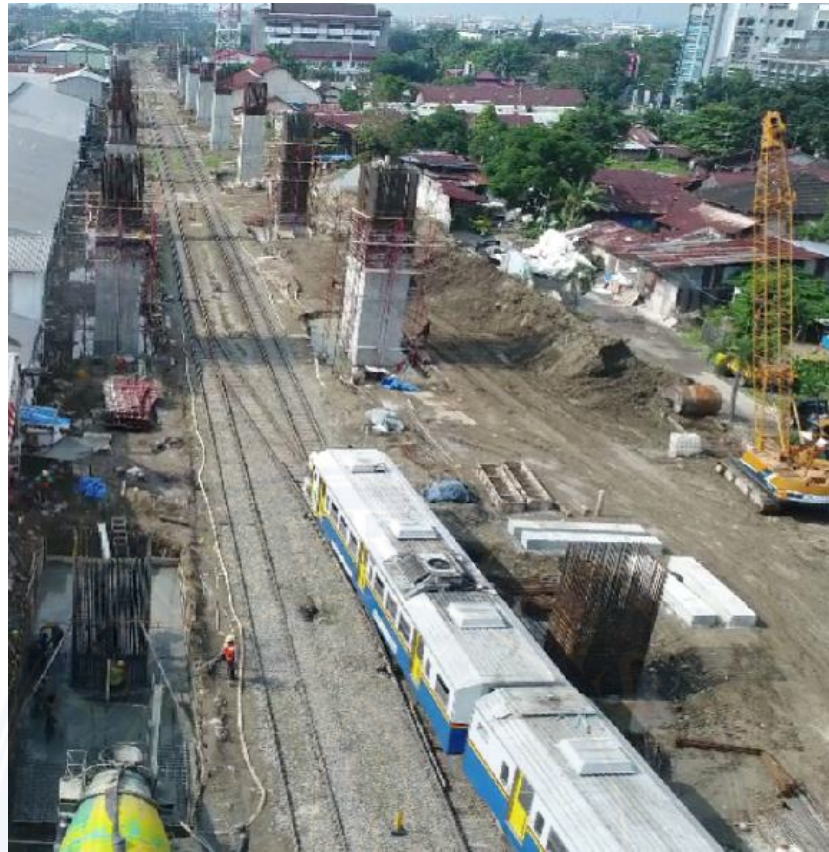


Penumpukkan Segmen Box Girder Di Stock Yard Sesuai Dengan Tipenya



Pengangkutan Segmen Box Girder Dari Pabrik Ke Lokasi Proyek

LAMPIRAN FOTO – FOTO SITUASI LAPANGAN



Pekerjaan Konstruksi Pier Sebagai Kolom Penyangga Box Girder



Pekerjaan Instalasi Segmen Box Girder Dengan Launching Gantry



Pemasangan Barrier Pada Tepi Atas Box Girder