

STUDI ALTERNATIF PERENCANAAN STRUKTUR ATAS *FLYOVER* MANAHAN DENGAN KONSTRUKSI BOX GIRDER PRATEGANG METODE SPAN-BY-SPAN

Novanda Erwan Saputra¹, Ester Priskasari², Mohammad Erfan²
^{1,2,3} Jurusan Teknik Sipil S-1 Institut Teknologi Nasional Malang
Email : Novandaerwansaputra@gmail.com¹

ABSTRACT

The design of the Manahan flyover uses a prestressed box girder with an external tendon system to streamline the combination of the relatively small volume of concrete and the prestressing force of the tendons so that a relatively small deflection is obtained in the span. The use of prestressed box girders is more profitable than the I-girder beam at a level crossing of the Solo - Yogyakarta railroad track after the Jl. Adi Sucipto - Jl. MT Hariyono towards Jl. Dr. Moewardi, Surakarta City because the method of implementing the I-girder beam causes more traffic jams.

Statics analysis uses certain static and segmental implementation methods (span-by-span method) to obtain section properties of the box girder cross section. The rules that the author uses in the calculation are SNI 1725-2016, SNI 2847-2013. The discussion materials include tendon layout planning, loss of prestressed force, control of stress and deflection, box girder-shear reinforcement, and end block. The prestressed cable used is the VSL tendon type GC Grade 270, low relaxation strand type 6-37 units.

The results obtained from the pre-stressed box girder planning are used 20 segmentals which are divided into 3 types of segments, namely the pedestal segment, the deviator segment, and the standard segment. Using 12 VSL type GC tendons with 35 strands per tendon. The deflection that occurs is 5.194 cm (√) and there is no tensile stress.

Keywords : *Prestressed Box Girder, Span-by-Span Method, Tendon VSL*

ABSTRAK

Perencanaan jembatan layang Manahan menggunakan box girder prategang dengan system external tendon untuk mengefisiensikan kombinasi antara volume beton yang relative kecil dengan gaya prategang tendon sehingga didapat lendutan yang relative kecil pada bentang. Penggunaan box girder prategang lebih menguntungkan dibandingkan balok I – girder pada perlintasan sebidang jalur rel kereta api Solo – Yogyakarta setelah simpang Jl. Adi Sucipto - Jl. MT Hariyono ke arah Jl. Dr. Moewardi, Kota Surakarta dikarenakan metode pelaksanaan balok I – girder lebih menyebabkan macet.

Analisa statika menggunakan statis tertentu dan metode pelaksanaan secara segmental (metode span-by-span) untuk mendapatkan section properties dari penampang box girder. Peraturan yang penulis gunakan dalam perhitungan adalah SNI 1725-2016, SNI 2847-2013. Materi pembahasan meliputi perencanaan tata letak tendon, kehilangan gaya prategang, kontrol tegangan dan lendutan, penulangan box girder-geser, dan end block. Kabel prategang yang digunakan adalah tendon VSL type GC Grade 270, *low relaxation strand* dengan tipe 6-37 unit.

Hasil yang diperoleh dari perencanaan box girder prategang ialah, digunakan 20 segmental yang terbagi menjadi 3 jenis segmen yaitu segmen tumpuan, segmen deviator, dan segmen standar. Menggunakan 12 buah tendon VSL tipe GC dengan 35 strand tiap tendon. Adapun lendutan yang terjadi sebesar 5,194 cm (√) dan tidak terjadi tegangan tarik.

Kata Kunci : *Box Girder Prategang, Metode Span-by-Span, Tendon VSL*

1. PENDAHULUAN

Flyover Manahan merupakan salah satu jembatan layang di Kota Surakarta, Jawa Tengah yang terletak diatas perlintasan sebidang rel kereta Solo – Yogyakarta. Pembangunan jembatan layang ini ditujukan untuk mengatasi kemacetan akibat perlintasan kereta api dan pertemuan arus lalu lintas pada pertigaan Jl. Adi Sucipto – Jl. MT Haryono – Jl. Doktor Moewardi.

Pembangunan flyover Manahan dengan menggunakan balok I – girder dengan system onstruksi elevated toll road pada jalur – jalur eksisting yang sibuk dan macet akibat perlintasan kereta api sebidang. Dari permasalahan diatas maka perlu di lakukan *redesign* menggunakan struktur penampang box girder segmental prategang dengan metode span-by-span.

Penggunaan system external tendon bertujuan untuk mendapatkan efisiensi kombinasi antara volume beton yang kecil dengan gaya prategang sehingga didapatkan lendutan yang kecil pada bentang tengah jembatan.

Tujuan Perencanaan

Adapun tujuan dari Tugas Akhir ini untuk :

1. Mengetahui dimensi beton *box girder* yang digunakan pada gelagar.
2. Mengetahui jumlah dan diameter tendon yang dibutuhkan dalam satu penampang.
3. Mengetahui persentase kehilangan prategang yang terjadi dengan menggunakan external prestressed tendon.
4. Mengetahui besar lendutan dan jenis tegangan yang terjadi pada box girder.

Batasan Masalah

Mengingat keterbatasan waktu, perencanaan jembatan prategang mengambil beberapa batasan :

1. Metode pemberian gaya prategang *Post Tension-segmental*.
2. Panduan perencanaan Tugas Akhir ini mengacu pada :
 - a) SNI 1725-2016 tentang pembebanan untuk jembatan.
 - b) SNI 2833:2016 tentang perencanaan jembatan terhadap beban gempa.
 - c) SNI 2847-2013 tentang persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung.
 - d) SNI 7833-2012 tentang tata cara perencanaan beton pracetak dan beton prategang untuk bangunan gedung.
 - e) AASHTO-PCI-ASBI 2000 tentang *segmental box girder standars for span-by-span and balanced cantilever construction*.

2. LANDASAN TEORI

Beton Prategang

Definisi beton prategang (*prestressed concrete*) menurut SNI 2847-2013 (Pasal 2.2) yaitu beton struktural dimana tegangan dalam diberikan untuk mereduksi tegangan tarik potensial dalam beton yang dihasilkan dari beban.

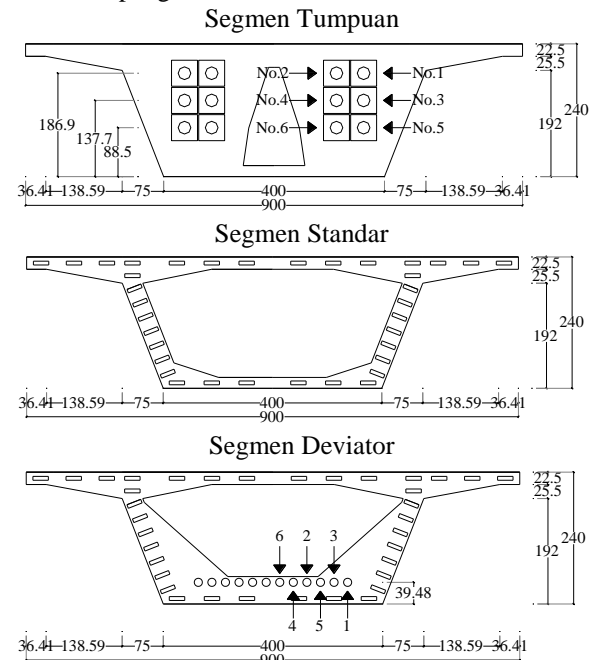
Precast Segmental Box Girder

Box girder merupakan jenis penampang beton prategang yang mana struktur utamanya berupa balok – balok berbentuk kotak berongga dengan tujuan untuk mendapatkan momen inersia yang tinggi dengan berat sendiri beton yang ringan.

Desain Jembatan Segmental Box Girder

Jembatan segmental seharusnya dibangun seperti struktur bentang tunggal menerus untuk menghindari adanya sambungan kabel *post-tension*. Dengan digunakannya system *external post-tension* maka diperukan 3 maxam segmen yang berbeda, diantaranya :

- Segmen Tumpuan : Bagian ini terletak di ujung atau tepat diatas abutment.
- Segmen Standar : Dimensi standar box girder yang digunakan.
- Segmen Deviator : Bagian ini bertujuan untuk pengatur deviasi tendon.



Gambar 1 Tipe Segmen *Box Girder*
 Sumber : (AASHTO-PCI-ASBI, 2000)

Gaya Prategang

Momen total yang terjadi berpengaruh pada gaya prategang. Gaya prategang yang disalurkan harus memenuhi kontrol batas pada saat kritis. Persamaan

berikut menjelaskan hubungan antara momen total dengan gaya prategang (T.Y Lin - Burns, 1988)

- Bila perbandingan $\frac{M_G}{M_T} < 20\% - 30\%$ maka M_T yang terjadi relative besar sehingga digunakan persamaan berikut :

$$F=T=\frac{M_T}{0,5 h}$$

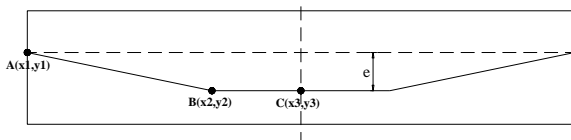
- Bila perbandingan $\frac{M_G}{M_T} > 20\% - 30\%$ maka M_T yang terjadi relative besar sehingga digunakan persamaan berikut :

$$F=T=\frac{M_T}{0,65 h}$$

Dimana : M_T = Momen total
 M_G = Momen beban mati
 h = Tinggi penampang

External Tendon

External prestressed tendon adalah tipe model tendon prategang yang diposisikan atau dipasang diluar badan penampang. Penggunaan system external prestressed tendon menghasilkan bentuk lintasan tendon berbentuk trapesoidal.



Gambar 2 Bentuk Tendon Trapesoidal (Eksternal Tendon)

Sumber : (N Krishna Raju, 1993)

Untuk mendapatkan koordinat garis tendon digunakan persamaan garis yang melalui 2 titik sebagai berikut :

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

Dimana : y = Koordinat sumbu y tendon yang ditinjau

x = Koordinat sumbu x tendon yang ditinjau

y_1 = Koordinat sumbu y titik A

y_2 = Koordinat sumbu y titik B

x_1 = Koordinat sumbu x titik A

x_2 = Koordinat sumbu x titik B

Kehilangan Gaya Prategang

Dalam perencanaan beton pratekan, analisis gaya-gaya efektif dari tendon penting sekali untuk diketahui. Dalam buku T.Y Lin dan Ned H burns tahun 1998 disebutkan bahwa kehilangan gaya prategang akan terjadi dalam dua tahap dan keduanya sangat mempengaruhi hasil akhir gaya-gaya efektif tendon yang terjadi.

1) Tahap pertama, pada saat setelah peralihan gaya prategang ke penampang, tegangan dievaluasi sebagai tolak ukur perilaku elemen struktur. Pada tahap ini kehilangan gaya prategang meliputi :

- Perpendekan elastis beton (ES)
- Friksi/Gesekan tendon (FR)
- Pergeseran angkur (ANC)

2) Tahap kedua, pada saat beban bekerja setelah semua gaya prategang terjadi dan tingkayan prategang efektif jangka panjang telah tercapai. Akibat waktu yang lama akan terjadi kehilangan gaya prategang sebagai berikut :

- Rangkak beton (CR)
- Susut beton (SH)
- Relasi baja prategang (RE)

Secara umum kehilangan gaya prategang dapat digolongkan menjadi 2 yaitu :

- Kehilangan gaya prategang langsung (*immediate*)
 - Perpendekan elastis beton (ES)
 - Friksi/Gesekan tendon (FR)
 - Pergeseran angkur (ANC)
- Kehilangan gaya prategang berdasarkan waktu (*time dependent losses*)
 - Rangkak beton (CR)
 - Susut beton (SH)
 - Relasi baja prategang (RE)

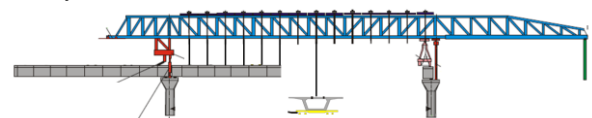
Lendutan

Lendutan pada jembatan prategang dapat disebabkan oleh :

- Lendutan akibat gaya prategang efektif
- Lendutan akibat beban mati
- Lendutan akibat beban hidup

Metode Konstruksi

Konstruksi jembatan box girder dapat dilakukan dengan berbagai macam metode, diantaranya adalah metode span-by-span. Metode span-by-span adalah metode pelaksanaan konstruksi jembatan precast segmental box girder, dimana satu bentang jembatan dikerjakan sampai slesai kemudian berlanjut ke bentang selanjutnya menggunakan Launching Gantry.



Gambar 3 Ilustrasi Span by span dengan Launching Gantry

Sumber : (Rombach, 2002)

3. METODOLOGI PERENCANAAN

Pengumpulan Data dan Literatur

Data – data perencanaan diperoleh dari hasil pengamatan lapangan/eksisting. Flyover Manahan didesain ulang menggunakan *box girder prestressed*. Adapun data – data yang digunakan dalam perencanaan ini sebagai berikut :

1. Panjang jembatan : 50 m
2. Lebar jembatan : 9 m
3. Lebar rencana jalan : 8 m
4. Rencana lajur jalan : 2 arah 4 lajur @ 2,95 m
5. Lebar parapet : 2 x 0,5 m
6. Gelagar utama : Box girder

Preliminary Desain

Dalam perencanaan ini menggunakan jenis single box girder dengan desain penampang box girder mengacu pada AASHTO-PCI-ASBI Segmental Box Girder Standards for Span-by-Span and Balanced Cantilever Construction, 2000.

Pembebanan Pada Struktur Utama Jembatan

Pembebanan yang diterapkan mengacu kepada muatan atau aksi lain yang timbul pada suatu jumebtan berdasarkan acuan SNI 1725-2016. Beban – beban yang bekerja antara lain sebagai berikut :

- a. Berat sendiri (MS)
- b. Beban mati tambahan (MA)
- c. Beban lalu lintas
 - Beban lajur “D” sesuai dengan yang terdefiniskan dalam SNI 1725-2016 pasal 8.3 terdiri dari beban terbagi rata (BTR) dan beban garis terpusat (BGT).
- d. Gaya rem (TB)
- e. Beban Angin (EW)

Faktor Kombinasi Pembebanan

Pada perencanaan jembatan prategang ini menggunakan factor beban pada kondisi beban layan dengan analisis elastis dengan acuan pada SNI 7833-2012 pasal 6.10.

Perhitungan Gaya Prategang Awal

- Tegangan ijin beton saat pemberian gaya prategang awal :
 - Tegangan tekan : $\sigma_{ci} = 0,8f'_c$
- Tegangan ijin beton segera sesudah penyaluran gaya prategang
 - Tegangan tekan : $\sigma_{ci} = 0,6f'_{ci}$ (SNI 7833-2013 Ps.6.4.1(a)).
 - Tegangan tarik : $\sigma_{ti} = 0,25\sqrt{f'_{ci}}$ (SNI 7833-2013 Ps.6.4.1(c)).
- Tegangan ijin beton saat beban layan dan setelah kehilangan gaya prategang
 - Tegangan tekan : $\sigma_{ci} = 0,45f'_{ci}$ (SNI 7833-2013 Ps.6.4.2(a)).
 - Tegangan tarik : $\sigma_{ti} = 0,50\sqrt{f'_{ci}}$ (SNI 7833-2013 Ps.6.4.1(c)).
- Besar tegangan gaya prategang
 - Tegangan: $f_{a,b} = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o.e.y}{I_g} \pm \frac{M_G.y}{I_g}$

Kehilangan Gaya Prategang

Secara umum kehilangan gaya prategang dapat digolongkan menjadi 2 yaitu :

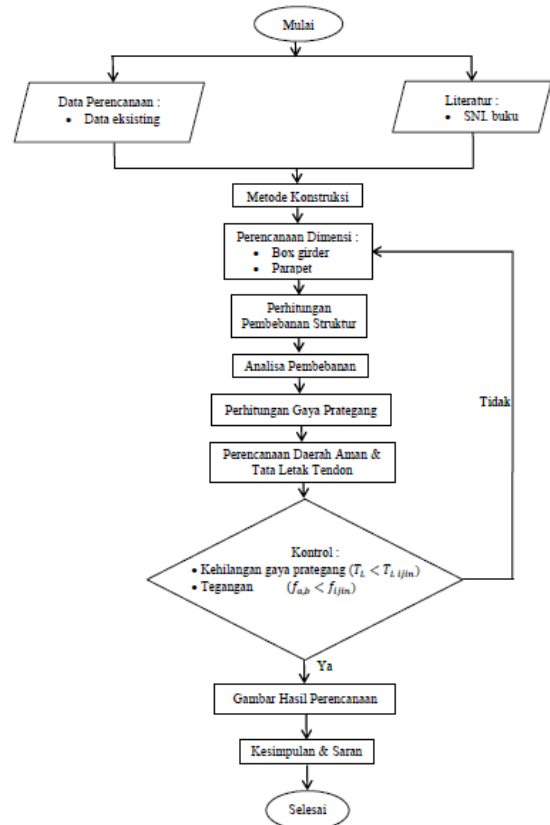
- A. Kehilangan gaya prategang langsung (*immediate*)
 - Perpendekan elastis beton (ES)
 - Friksi/Gesekan tendon (FR)
 - Pergeseran ankur (ANC)
- B. Kehilangan gaya prategang berdasarkan waktu (time dependent losses)
 - Rangkak beton (CR)

- Susut beton (SH)
- Relasi baja prategang (RE)

Perencanaan Struktur Sekunder

Struktur sekunder pada perecanaan ini berupa pembatas jalan atau parapet jalan.

Diagram Alir



Gambar 4 Diagram Alir
 Sumber : (Hasil Perencanaan)

4. ANALISA STRUKTUR UTAMA

Data Perencanaan

Dalam Tugas Akhir ini akan direncanakan Flyover Manahan dengan konstruksi box girder pratekan struktur statis tak tentu.

- Nama jembatan : Flyover Manahan
- Lokasi jembatan : Perlintasan sebidang jalur rel kereta api Solo – Yogyakarta setelah simpang Jl. Adi Sucipto – Jl. MT. Hariyono kearah Jl. Dr. Moewardi, Kota Surakarta, Jawa Tengah
- Tipe jembatan : *Precast segmental box girder* dengan struktur beton pratekan tipe *single box*
- Metode pelaksanaan : *Metode Span-by-Span* dengan *Launching Gantry*
- Lebar total jembatan, (L): 50 m

Lebar lantai kend. (B_1) : 8 m
 Lebar trotoar : 2 x 0,5 m
 Jumlah lajur : 2 jalur 4 lajur
 Lebar tiap lajur : 2,95 m

Data-data bahan

Beton

- Kuat tekan beton prategang (f_c') = 48,9 MPa (K-600)
- Kuat tekan beton struktur sekunder (f_c') = 34,3 MPa

Baja

- Mutu baja untuk penulangan box girder (f_y) = 390 MPa
- Mutu baja untuk penulangan struktur sekunder (f_y) = 240 MPa
- Dalam perencanaan ini akan digunakan jenis kabel tendon *VSL type GC Grade 270, low relaxation strand ASTM A416-06* dan angkur *VSL type GC External Grouted Post-Tensioning*

Preliminari Design

Direncanakan menggunakan dimensi box girder, $h = 2,4$ m sebagai berikut :

a. Segmen Tumpuan

Data penampang :

$$A = 11,7 \text{ m}^2$$

$$y_b = 1,377 \text{ m}$$

$$y_a = 1,023 \text{ m}$$

$$I_g = 5,58 \text{ m}^4$$

b. Segmen Standar

Data penampang :

$$A = 5,33 \text{ m}^2$$

$$y_b = 1,334 \text{ m}$$

$$y_a = 1,066 \text{ m}$$

$$I_g = 4,03 \text{ m}^4$$

c. Segmen Deviator

Data penampang :

$$A = 8,89 \text{ m}^2$$

$$y_b = 1,625 \text{ m}$$

$$y_a = 0,775 \text{ m}$$

$$I_g = 5,25 \text{ m}^4$$

Pembebanan Struktur Utama

Analisa Beban Mati

a. Berat sendiri

- Segmen Tumpuan (Q_{MS1})
 $(Q_{MS1}) = A \times B_j \text{ beton} = 313,07 \text{ kN/m}$
- Segmen Standar (Q_{MS2})
 $(Q_{MS2}) = A \times B_j \text{ beton} = 161,61 \text{ kN/m}$
- Segmen Deviator (Q_{MS3})
 $(Q_{MS3}) = A \times B_j \text{ beton} = 191,76 \text{ kN/m}$

b. Beban Mati Tambahan

- Aspal+overlay dan air hujan (Q_{MA1})
 $(Q_{MA1}) = A \times B_j \text{ aspal \& airhujan} = 21,52 \text{ kN/m}$
- Berat utilitas dan lampu jalan (Q_{MA2})
 $(Q_{MA2}) = P = 0,10 \text{ kN/m}$

Analisa Beban Lalu Lintas

a. Beban Lajur "D" (TD)

- **Beban terbagi rata (BTR)**, untuk bentang 50 m

$$q = 9 \times \left(0,5 + \frac{15}{L}\right) = 7,20 \text{ kN/m}$$

$$q_1 = q \times B_1 \times 100\% = 57,6 \text{ kN/m}$$

- **Beban garis terpusat (BGT)**

Besar intensitas BGT (p) = 49 kN/m (SNI 1725-2016 Ps.8.3.1) dan Faktor beban dinamis (FBD) = 40% untuk 50 m (SNI 1725-2016 Ps.8.6)

$$p_1 = p \times B_1 \times 100\% = 392 \text{ kN}$$

$$p = p_1 + (40\% \times p_1) = 548,8 \text{ kN}$$

b. Beban Truc "T" (TT)

Diasumsikan untuk 3 gandar beban truk (T_u) = 500 kN (SNI 1725-2016 Ps.8.4.1)

$$T_{TR} = T_u \times FBD = 200 \text{ kN}$$

Analisa Beban Gaya Rem (TB)

- Gaya rem = 25% x T_u x jml lajur = 250 kN
 - Gaya rem = 5% x berat truk rencana x ($q \times L$) x jml lajur = 375,2 kN
- Gaya rem (TB) harus diambil yang terbesar = 375,2 kN (SNI 1725-2016 Ps.8.7)

Analisa Beban Angin (EW)

a. Beban Angin pada Struktur (EWs)

Tekanan angina rencana, (P_D) = 0,00221 MPa

$$EWs = P_D \times (h \text{ box girder} + h \text{ parapet}) = 7,529 \text{ kN/m}$$

b. Beban Angin pada Kendaraan (EW1)

$$EW_1 = 1,46 \text{ N/mm (SNI 1725-2016 Ps.9.6.1.2)}$$

Analisa Perhitungan Momen

Kombinasi factor beban pada keadaan batas layan yang digunakan sebagai berikut :

$$\bullet \text{ Layan I : } 1MS + 1MA + 1TD + 1TB + 0,3EWs + 1EW1$$

$$\bullet \text{ Layan III : } 1MS + 1MA + 0,8TD + 0,8TB$$

Berdasarkan perhitungan, maka didapat hasil momen maks. pada keadaan batas layan I sebagai berikut :

- Akibat berat sendiri, (M_O) = 72604,264 kNm
- Akibat beban mati, (M_G) = 79350,759 kNm
- Akibat kombinasi total, (M_T) = 106526,330 kNm

Tegangan ijin Bahan

Beton Prategang

- Saat pemberian prategang awal
 Tegangan tekan, (σ_{ci})
 $\sigma_{ci} = 0,8f'_c = 39,08 \text{ Mpa}$
- Segera sesudah penyaluran prategang
 Tegangan tekan dalam penampang beton tidak boleh melampau nilai sebagai berikut :
 $\sigma_{ci} = 0,6f'_c = 23,45 \text{ Mpa}$
 Untuk struktur jembatan segmental pracetak tegangan tarik yang diijinkan :
 $\sigma_{ti} = 0 \text{ Mpa}$
- Keadaan akhir dan setelah kehilangan gaya prategang

Tegangan tekan dalam penampang beton tidak boleh melampau nilai sebagai berikut :

$$\sigma_{ci} = 0,45f'_{ci} = 17,59 \text{ Mpa}$$

Untuk struktur jembatan segmental pracetak tegangan tarik yang diijinkan :

$$\sigma_{ti} = 0 \text{ Mpa}$$

- Modulus Elastisitas, (E)

$$E = W_c^{1,5} \times 0,043 \sqrt{f'_c} = 37568,83 \text{ MPa}$$

Baja Prategang

- Modulus Elastisitas, (E_s)

$$E_s = 195000 \text{ MPa}$$

- Tegangan putus kabel, (f_{pu})

$$f_{pu} = 1145,93 \text{ Kn}$$

- Tegangan leleh kabel, (f_{py})

$$f_{py} = 916,75 \text{ kN}$$

- Tegangan tarik ijin kabel saat pengangkuran, ($f_{jacking}$)

$$f_{jacking} = 0,94 \times f_{py} = 861,74 \text{ kN}$$

- Tegangan tarik ijin kabel setelah pengangkuran, ($f_{jacking}$)

$$f_{jacking} = 0,7 \times f_{pu} = 802,15 \text{ kN}$$

Gaya Prategang Tendon

Direncanakan menggunakan kabel prategang / tendon VSL type Grade 270, low relaxation strand ASTM A416-06 dengan spesifikasi bahan seperti berikut :

Diameter strand, (d) : 15,2 mm

Luas nominal 1 strand, (Ast) : 140 mm²

Jenis stand : 7 wire strands

Jumlah untaian strand : 35

Luas penampang tendon, (At) : 6370 mm²

Beban nominal 1 stand, (Fpu) : 260 kN (100%)
 : 208,56 kN (80%)

Beban nominal 1 tendon, (Fpu) : 7299,6 kN

Diameter selongsong tendon : 160 mm

Tipe angkur VSL : GCStirrup
 Reinforcement (6-37 unit)

Dimensi : 470 mm x 470 mm

Gaya prategang, (F)

$$F = \frac{M_T}{0,65 h} = 68286,109 \text{ kN}$$

Gaya prategang awal setelah kehilangan 20%, (F_0)

$$F_0 = \frac{F}{80\%} = 85357,636 \text{ kN}$$

Jumlah tendon, (n_t)

$$n_t = \frac{F_0}{\text{Beban nominal 1 tendon}} = 11,69 \approx 12 \text{ buah}$$

Gaya prategang tendon, ($f_{0 \text{ ada}}$)

$$f_{0 \text{ ada}} = n_t \times F_{pu \text{ 1 tendon (80\%)}} = 87595,2 \text{ kN}$$

Gaya prategang efektif, ($F_{rencana}$)

$$F_{rencana} = 0,8 \times F_{0 \text{ ada}} = 70076,16 \text{ kN}$$

Koordinat Tendon

Diambil contoh untuk perhitungan koodinat tendon no. 1&2 pada segmen tumpuan :

Tendon no.1&2 terletak pada garis melalui 2 titik koordinat A (0;186,9) dan B (1800;39,48) dan dilakukan substitusi ke persamaan :

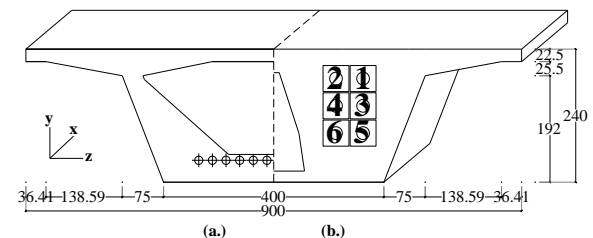
$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}$$

$$y = -0,0819x + 186,9$$

Melakukan substitusi jarak (x) pada persamaan diatas sehingga didapat koordinat tendon sebagai berikut :

Tabel 1 Koordinat Sumbu X & Sumbu Y Letak Tendon

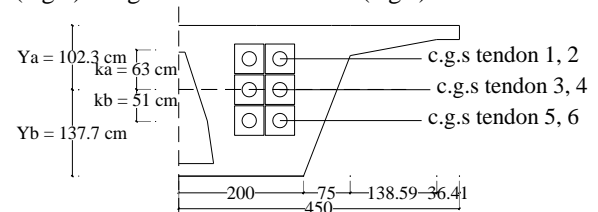
X	Tendon No.1&2	Tendon No.3&4	Tendon No.5&6
	Y	Y	Y
(m)	(cm)	(cm)	(cm)
0,0	186,90	137,70	88,50
5,0	145,95	110,42	74,88
10,0	105,00	83,13	61,27
15,0	64,05	55,85	47,65
20,0	32,28	32,28	32,28
25,0	32,28	32,28	32,28



Gambar 5 Perencanaan Posisi Tendon Pada :
 (a.) Segmen Deviator, (b.) Segmen Tumpuan
 Sumber : (Hasil Perencanaan)

Eksentrisitas Tendon

Eksentrisitas tendon merupakan jarak antara statis momen penampang box girder terhadap serat bawah (c.g.c) dengan titik berat tendon (c.g.s).



Gambar 6 Letak Eksentrisitas Tendon
 (Tendon no.3&4)

Sumber : (Hasil Perencanaan)

Tegangan Akibat Tendon

Tegangan akibat tendon pada penampang box girder terjadi pada beberapa kondisi seperti berikut :

a. Sebelum Kehilangan Gaya Prategang

Berdasarkan SNI 03-7833-2012 Ps.6.4.1, tegangan akibat tendon tidak boleh melampau tegangan ijin berikut :

Tegangan tekan = 23,45 MPa

Tegangan tarik = 1,56 MPa

Diambil contoh perhitungan tegangan akibat tendon pada jarak 25 m pada segmen standar

Diketahui :

- Fo : 87595200 N
- A : 5329333,6 mm²
- Ig : 4,03 m⁴
- ya : 1,066 m
- yb : 1,334 m
- M_G : 79350,759 kNm
- e : 1052,701 mm

Serat atas :

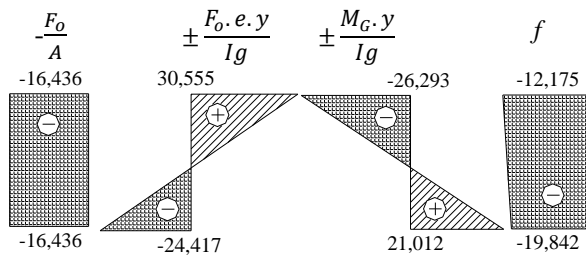
$$f_a = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -12,175 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tarik} = 1,563 \text{ MPa}$$

Serat bawah :

$$f_b = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -19,842 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tekan} = 23,45 \text{ MPa}$$



Gambar 7 Tegangan Sebelum Kehilangan Gaya

Prategang

Sumber : (Hasil Perencanaan)

b. Setelah Kehilangan Gaya Prategang

Berdasarkan SNI 03-7833-2012 Ps.6.4.1, tegangan akibat tendon tidak boleh melampaui tegangan ijin berikut :

Tegangan tekan = 23,45 MPa

Tegangan tarik = 1,56 MPa

Diambil contoh perhitungan tegangan akibat tendon pada jarak 25 m pada segmen standar

Diketahui :

- Fo : 87595200 N
- A : 5329333,6 mm²
- Ig : 4,03 m⁴
- ya : 1,066 m
- yb : 1,334 m
- M_G : 79350,759 kNm
- e : 1052,701 mm

Serat atas :

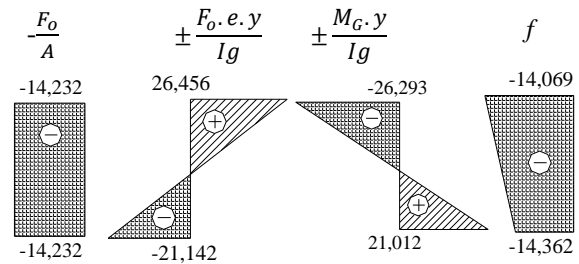
$$f_a = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -14,069 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tarik} = 1,563 \text{ MPa}$$

Serat bawah :

$$f_b = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -14,362 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tekan} = 23,45 \text{ MPa}$$



Gambar 8 Tegangan Setelah Kehilangan Gaya

Prategang

Sumber : (Hasil Perencanaan)

c. Setelah Semua Beban Bekerja

Berdasarkan SNI 03-7833-2012 Ps.6.4.1, tegangan akibat tendon tidak boleh melampaui tegangan ijin berikut :

Tegangan tekan = 17,59 MPa

Tegangan tarik = 3,13 MPa

Diambil contoh perhitungan tegangan akibat tendon pada jarak 25 m pada segmen standar

Diketahui :

- Fo : 75845513,829 N
- A : 5329333,6 mm²
- Ig : 4,03 m⁴
- ya : 1,066 m
- yb : 1,334 m
- M_G : 79350,759 kNm
- e : 1052,701 mm

Serat atas :

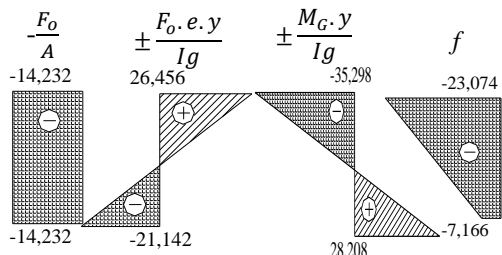
$$f_a = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -23,074 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tarik} = 3,126 \text{ MPa}$$

Serat bawah :

$$f_b = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -7,17 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tekan} = 17,578 \text{ MPa}$$



Gambar 9 Tegangan Semua Beban Bekerja

Sumber : (Hasil Perencanaan)

d. Pengangkatan / Erection

Berdasarkan SNI 03-7833-2012 Ps.6.4.1, tegangan akibat tendon tidak boleh melampaui tegangan ijin berikut :

Tegangan tekan = 17,59 MPa

Tegangan tarik = 3,13 MPa

Diambil contoh perhitungan tegangan akibat tendon pada jarak 25 m pada segmen standar

Diketahui :

- Fo : 75845513,829 N
- A : 5329333,6 mm²
- Ig : 4,03 m⁴
- ya : 1,066 m

$y_b : 1,334 \text{ m}$
 $M_G : 79350,759 \text{ kNm}$
 $e : 1052,701 \text{ mm}$

Serat atas :

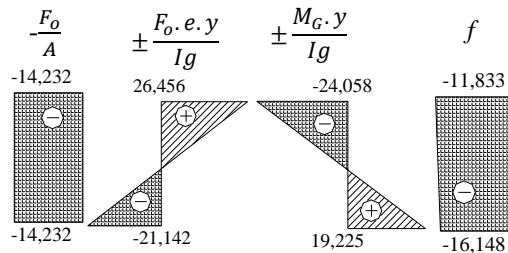
$$f_a = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -11,833 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tarik} = 3,126 \text{ MPa}$$

Serat bawah :

$$f_b = -\frac{F_o}{A} \pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g} \pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$$

$$= -16,148 \text{ MPa (Tekan)} < \sigma_{tekan} = 17,587 \text{ MPa}$$



Gambar 10 Tegangan Pengangkatan / Erection
 Sumber : (Hasil Perencanaan)

Tabel 4.2 Kontrol Tegangan Akibat Tendon Sebelum Kehilangan Gaya Prategang

x (m)	Serat	M_G (kNm)	e (mm)	$\pm \frac{F_o}{A}$ (MPa)	$\pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g}$ (MPa)	$\pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$ (MPa)	f	Ket.
0	a	0,000	-0,50	-7,46	-0,014	0,000	-7,48	OK
	b			-7,46	0,012	0,000	-7,45	OK
5	a	61822,7	272,33	-16,44	7,905	-8,508	-17,05	OK
	b			-16,44	-6,317	6,799	-15,95	OK
10	a	46039,4	545,17	-16,44	15,824	-15,255	-15,87	OK
	b			-16,44	-12,645	-12,191	-16,89	OK
15	a	61822,7	818,00	-16,44	23,743	-20,485	-13,18	OK
	b			-16,44	-18,974	16,371	-19,04	OK
20	a	72981,4	1052,7	-16,44	30,555	-24,183	-10,06	OK
	b			-16,44	-24,417	19,325	-21,53	OK
25	a	79350,8	1052,7	-16,44	30,555	-26,293	-12,17	OK
	b			-16,44	-24,417	21,012	-19,84	OK

Tabel 4.3 Kontrol Tegangan Akibat Tendon Setelah Kehilangan Gaya Prategang

x (m)	Serat	M_G (kNm)	e (mm)	$\pm \frac{F_o}{A}$ (MPa)	$\pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g}$ (MPa)	$\pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$ (MPa)	f	Ket.
0	a	0,000	-0,50	-6,461	-0,013	0,000	-6,473	OK
	b			-6,461	0,010	0,000	-6,451	OK
5	a	61822,7	272,33	-14,23	6,844	-8,508	-15,90	OK
	b			-14,23	-5,469	6,799	-12,90	OK
10	a	46039,4	545,17	-14,23	13,701	-15,255	-15,79	OK
	b			-14,23	-10,949	12,191	-12,99	OK
15	a	61822,7	818,00	-14,23	20,558	-20,485	-14,16	OK
	b			-14,23	-16,429	16,371	-14,29	OK
20	a	72981,4	1052,7	-14,23	26,456	-24,183	-11,96	OK
	b			-14,23	-21,142	19,325	-16,05	OK
25	a	79350,8	1052,7	-14,23	26,456	-26,293	-14,07	OK
	b			-14,23	-21,142	21,012	-14,36	OK

Tabel 4.4 Kontrol Tegangan Akibat Tendon Setelah Semua Beban Bekerja

x (m)	Serat	M_G (kNm)	e (mm)	$\pm \frac{F_o}{A}$ (MPa)	$\pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g}$ (MPa)	$\pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$ (MPa)	f	Ket.
0	a	0,000	-0,50	-6,461	-0,013	-0,382	-6,856	OK
	b			-6,461	0,010	0,305	-6,145	OK
5	a	61822,7	272,33	-14,23	6,844	-11,995	-19,38	OK
	b			-14,23	-5,469	9,585	-10,12	OK
10	a	46039,4	545,17	-14,23	13,701	-21,156	-21,69	OK
	b			-14,23	-10,949	16,907	-8,274	OK
15	a	61822,7	818,00	-14,23	20,558	-28,111	-21,78	OK
	b			-14,23	-16,429	22,464	-8,196	OK
20	a	72981,4	1052,7	-14,23	26,456	-32,843	-20,62	OK
	b			-14,23	-21,142	26,246	-9,128	OK
25	a	79350,8	1052,7	-14,23	26,456	-35,298	-23,07	OK
	b			-14,23	-21,142	28,208	-7,166	OK

Tabel 4.5 Kontrol Tegangan Akibat Tendon Saat Pengangkatan / Erection

x (m)	Serat	M_G (kNm)	e (mm)	$\pm \frac{F_o}{A}$ (MPa)	$\pm \frac{F_o \cdot e \cdot y}{I_g}$ (MPa)	$\pm \frac{M_G \cdot y}{I_g}$ (MPa)	f	Ket.
0	a	0,000	-0,50	-6,461	-0,013	0,000	-6,473	OK
	b			-6,461	0,010	0,000	-6,451	OK
5	a	61822,7	272,33	-14,23	6,844	-7,705	-15,09	OK
	b			-14,23	-5,469	6,157	-13,54	OK
10	a	46039,4	545,17	-14,23	13,701	-13,826	-14,36	OK
	b			-14,23	-10,949	11,049	-14,13	OK
15	a	61822,7	818,00	-14,23	20,558	-18,609	-12,28	OK
	b			-14,23	-16,429	14,871	-15,79	OK
20	a	72981,4	1052,7	-14,23	26,456	-22,038	-9,813	OK
	b			-14,23	-21,142	27,611	-17,76	OK
25	a	79350,8	1052,7	-14,23	26,456	-24,058	-11,83	OK
	b			-14,23	-21,142	19,225	-16,15	OK

Kehilangan Gaya Prategang

a. Kehilangan gaya prategang langsung (*immediate*)

- Perpendekan elastis beton (ES)

$$ES = K_{es} \times n \times f_{cir}$$

$$F_{es} = ES \times At$$

$$= 4277,766 \text{ kN}$$

- Friksi/Gesekan tendon (FR)

$$F_x = P_{pj} \times e^{-(KLx + \mu \cdot \alpha)}$$

$$= 1965,155 \text{ kN}$$

- Pergeseran angkur (ANC)

$$F_s = 2E_s \times \frac{d}{x}$$

$$= 451,769 \text{ kN}$$

b. Kehilangan gaya prategang berdasarkan waktu (*time dependent losses*)

- Rangak beton (CR)

$$CR = K_{cr} \times \frac{ES}{E_c} \times (f_{cir} - f_{cds})$$

$$F_{cr} = CR \times At$$

$$= 516,867 \text{ kN}$$

- Susut beton (SH)

$$SH = \epsilon_{es} \times K_{sh} \times E_s$$

$$F_{SH} = SH \times At$$

$$= 2729,08 \text{ kN}$$

- Relasi baja prategang (RE)

$$RE = (K_{re} - J(SH + CR + ES)) \times c$$

$$F_{RE} = RE \times At$$

$$= 1809,053 \text{ kN}$$

Persentase kehilangan gaya prategang total sebesar :

$$\%Loss = \frac{(F_{ES} + F_X + F_S + F_{CR} + F_{SH} + F_{RE})}{P_{O \text{ rencana}}} 100\% \\ = 13,414 \% < 20\%$$

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

1. Perencanaan flyover Manahan menggunakan beton pracetak prategang dengan penampang box girder dengan lebar total 9 meter dengan bentang 50 meter. Flyover ini terdiri dari 22 segmen box girder dengan tinggi penampang box girder sebesar 2,4 meter yang terbagi menjadi 3 jenis segmen box girder, yaitu : segmen tumpuan (panjang segmen 1,56 meter), segmen deviator (panjang segmen 1,7 meter), dan segmen standar (panjang segmen 2,5225 meter). Adapun tebal slab atas sebesar 0,225 meter, tebal slab bawah sebesar 0,2 meter dan tebal slab web sebesar 0,35 meter.
2. Pada perencanaan ini menggunakan metode penarikan tendon pasca tarik (post-tension) dengan tendon VSL tipe GC Grade 270 low relaxation strand seri 6 – 37 dengan 35 untaian. Gaya prategang efektif terhadap beban putus 80% sebesar 70076,16 kN dengan diameter selubung tendon sebesar 160 mm dan memerlukan 12 buah tendon dengan tata letak masing – masing 6 tendon yang terpassang diluar penampang (external tendon).
3. Kehilangan gaya prategang total yang terjadi sebesar 13,414% dan telah memenuhi persyaratan kurang dari 20%.
4. Besar lendutan yang terjadi 5,194 cm (√) dan masih dalam batas lendutan ijin. Tidak terjadi tegangan tarik pada penampang box girder ditunjukkan dengan hasil resultan gaya bernilai negative.

Saran

1. Dalam merencanakan pedimensian penampang segmen perlu diperhatikan dimensi slab dan web karena akan berpengaruh terhadap beban yang bekerja, tataletak tendon, dan penulangan penampang sendiri.
2. Dalam merencanakan pembebanan yang bekerja pada struktur dan perencanaan tataletak tendon dianjurkan menggunakan aplikasi bantu seperti SAP 2000 atau MIDAS CIVIL agar didapat bentuk permodelan yang tepat dan teliti sehingga mempermudah dalam perencanaan dan meminimalisir kesalahan.
3. Dalam perencanaan tataletak tendon perlu diperhatikan spesifikasi bahan berupa pedimensian angkur, duct, dan tendon sendiri agar didapat data yang sesungguhnya dan perlu diperhatikan juga dalam pemilihan jumlah untaian/strand karena akan menentukan jumlah

tendon yang digunakan serta tataletak tendon seperti apa.

4. Dalam melakukan pengontrolan terhadap tegangan dan lendutan yang terjadi pada penampang box harus dilakukan dengan teliti dan sesuai dengan tegangan dan lendutan yang diijinkan.
5. Dalam perencanaan penulangan penampang perlu diperhatikan dan dilakukan pengaturan terhadap tataletak tendon dan dimensi penampang khususnya pada daerah end block (blok ujung) karena pada daerah tersebut terdapat banyak tulangan sehingga diperlukan pengaturan tataletak tendon dan pengaturan yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Avioffarbella, A., Purba, I., Permata, R., Delitriana, A., & Firmansjah, J. (2014). Pelaksanaan Jembatan Segmental Precast Box Girder Dengan Metode Span by SPan: Proyek Tol Bogor Ring Road. *Kolokium Jalan dan Jembatan*, 1-17.
- Bambang Supriyadi; Agus Setyo Muntohari. (2007). *Jembatan*. Yogyakarta: ISBN.
- Bridge Design Manual. (2011). *3rd Edition, First Release, November 2011*. PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute).
- Dhijayanti, A. P. (2012). *Faktor - Faktor Yang Mempengaruhi Tingkat Aksesibilitas Di Perlintasan Kereta Api Kota Surakarta*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Direktorat Jenderal Bina Marga. (2011). *Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan*. Bandung: BSN.
- Florinsia, Y. O. (2016). *Studi Perencanaan Struktur Atas Jembatan Baru Kali Manyar Kabupaten Gresik Menggunakan Beton Pratekan*. Jember: Progam Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Google Earth. (2019). www.earth.google.com. Dipetik Mei 10, 2019, dari <https://earth.google.com/web/@-7.55902998,110.80828576,98.08640071a,772.84954111d,35y,-16.42654392h,17.82498975t,0r>
- Ilham, M. N. (2008). *Perhitungan Balok Prategang (PCI - Girder)*. Yogyakarta.
- Ir. Soetoyo. (2002). *Konstruksi Beton Pratekan*. Surabaya: Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Institut Teknologi Sepuluh November.
- Nawy, G. E. (2001). *Beton Prategang Edisi Ketiga Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Nuur, A. A. (2018). *Perencanaan Jembatan Pondok Nongko Bayuwangi Menggunakan Box Girder*. Jember: Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Jember.
- Podolny, W., & Muller, J. M. (1982). *Construction and Design of Prestressed Concrete*

- Segmental Bridges*. U.S: Federal Highway Administration.
- Post-Tensioned Box girder Manual. (2016). U.S: U.S Department of Transportation.
- Prayogi, A. R. (2018). Perencanaan Struktur Atas Jembatan Beton Prategang Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pasuruan- Probolinggo Seksi III. *Diss* .
- Puslitbang Prasarana Transportasi. (2005). *Pelaksanaan Pekerjaan Beton Untuk Jalan dan Jembatan*. Departemen Pekerjaan Umum.
- Puspitasari, N. D. (2011). *Perencanaan jembatan Palu IV Dengan Konstruksi Box Girder Segmental Metode Pratekan Statis Tak Tentu*. Surabaya: Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Rombach, P. D.-I. (2002). Precast Segmental Box Girder Bridges With External Prestressing. *INSA Rennes* , 1-15.
- SNI 1725. (2016). *Pembebanan Untuk Jembatan*. Jakarta: BSN.
- SNI 2847. (2013). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- SNI 2847. (2013). *Prasyarat Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Sullivan, S. R. (2003). Behavior of Transverse Joints In Precast Deck Panel Systems. *Thesis* .
- T. Y. Lin ; H Burns. (1988). *Desain Struktur Beton Prategang Edisi Ketiga Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Vanessa. (2017). Modifikasi Perencanaan Struktur Fyover Menggunakan Segmental Box Girder Dengan Metode Span-By-Span: Proyek Jalan Tol Bekasi-Cawang-Kampung Melayu (BECAKAYU) Section 1C. Surabaya: Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik dan Perencanaan Sipil Institut Teknologi Sepuluh Nopember.