

Perancangan Ulang Struktur Atas Jembatan Gajah Wong Yogyakarta dengan Menggunakan Box Girder

(Redesigning Using Box Girder of the Upper Structure of Gajah Wong Bridge, Yogyakarta)

SENTOT HARDWIYONO, BAGUS SOEBANDONO, LUKMANUL HAKIM

ABSTRACT

The Gajah Wong bridge to be studied is located in road section of Selokan Mataram, connecting Gejayan Street and Seturan area, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta Province. This bridge was built in order to increase economic and to support traffic activities in this area. Gajah Wong bridge has 40 m span. The designing of this bridge used I girder, and then would be done redesigning another form of prestressed-concrete bridge which is box girder. This redesign method being used is Bridge Management System (BMS) 1992. Excel is used to analyze the structure. AutoCAD 2010 software was utilized for scetching the design. Girder designed using prestressed concrete structures with cross-sectional profile of a trapezoid - shaped box girder type . In designing the structure beam is used full - prestress post-tensioning with trapezoidal cross section box with 2.5 m high with 0,3 m floor-slab thickness. Prestressed-steel using 7 strands which is based on ASTM A-416 specification and used angkur 28 pieces of VSL type E-55.

Keywords: bridge, prestressed-concrete, box girder

PENDAHULUAN

Jembatan yang merupakan sarana penghubung antar daerah setiap tahun mengalami perkembangan seiring dengan meningkatnya jumlah penduduk dan tingkat perekonomian di sekitar daerah tersebut. Salah satunya adalah Jembatan Gajah Wong yang terletak di ruas jalan inspeksi Selokan Mataram, yang menghubungkan antara Jalan Gejayan dan Seturan, Kabupaten Sleman, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta. Pembangunan jembatan ini merupakan suatu upaya dalam meningkatkan aktivitas ekonomi dan menunjang aktivitas lalu lintas yang ada di daerah ini sehingga untuk menjangkau daerah yang satu dengan yang lain lebih efektif dan efisien.

Jembatan Gajah Wong memiliki panjang bentang 40 m. Perencanaan gelagar utama jembatan ini menggunakan I girder. Dalam penelitian ini akan dilakukan perancangan ulang jembatan beton prategang dengan bentuk lain, yaitu *box girder prestressed concrete* tipe

trapesium menggunakan peraturan *Bridge Management System (BMS-1992)*.

Secara umum jembatan *box girder* terbuat dari baja atau beton konvensional maupun prategang. Keutamaan dari *box-girder* adalah memiliki momen inersia yang tinggi dalam kombinasi dengan berat sendiri yang relatif ringan karena adanya rongga di tengah penampang.

Secara umum jembatan terbagi menjadi 3 bagian utama struktur, yakni:

1. Struktur atas (*upper structure*) merupakan bagian yang menerima beban langsung yang meliputi berat sendiri, beban mati, beban mati tambahan, beban lalu-lintas kendaraan, gaya rem dan beban pejalan kaki.
2. Struktur bawah (*sub structure*) adalah struktur yang berfungsi menyalurkan beban dari struktur atas termasuk beban lalu lintas ke tanah pendukung jembatan melalui fondasi.
3. Fondasi jembatan berfungsi meneruskan seluruh beban jembatan ke tanah dasar.

LANDASAN TEORI

Beton prategang merupakan penerapan gaya pratekan pada balok sedemikian rupa sebelum dikerjakan beban luar, guna meniadakan tegangan tarik serat beton yang terjadi saat beban luar bekerja (Nasution, 2009). Gaya prategang (*longitudinal*) yaitu gaya tekan yang memberikan prategang pada penampang di sepanjang bentang suatu elemen struktur sebelum bekerjanya beban mati dan hidup transversal (Nawy, 2001).

Beberapa jenis penampang jembatan beton prategang yakni :

1. Penampang I (*I-girder*)

Gelagar utama terdiri dari plat girder atau *rolled-I*, penampang I efektif menahan beban tekuk dan geser.

2. Penampang kotak maupun trapesium (*box girder*)

Gelagar utama terdiri dari satu atau beberapa balok kotak berongga dari beton, sehingga mampu menahan lendutan, geser dan torsi secara efektif.

3. Penampang U (*U-girder*)

Gelagar utama terdiri dari satu atau beberapa balok berpenampang U dan akan diperkuat baja-baja prategang di dalamnya.

Penarikan Tendon (Baja Prategang)

Penarikan baja prategang dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu :

1. Pratarik (*Pre-tensioning*), yaitu penarikan baja dilakukan sebelum pengecoran beton. Pada sistem penarikan awal (*pre tensioning*), untuk mempercepat proses penarikan tendon dilepaskan pada saat beton mencapai 60% – 80% kekuatan yang disyaratkan yaitu pada umur 28 hari.
2. Paskatarik (*Post-tensioning*), yaitu kebalikan dari sistem pratarik dimana penarikan baja dilakukan setelah beton mengeras. Bila kekuatan beton yang diperlukan telah tercapai, maka baja ditegangkan di ujung-ujungnya dan dijangkar.

Tahap Pembebanan

Salah satu pertimbangan istimewa pada beton prategang adalah banyaknya tahapan

pembebanan saat komponen struktur dibebani. Tahapan pembebanan tersebut dapat dikelompokkan sebagai berikut:

1. Gaya prategang awal ditetapkan, lalu pada saat transfer gaya ini disalurkan dari strands prategang ke beton.
2. Berat sendiri penuh W_G bekerja bersamaan dengan gaya prategang awal P_0 (apabila komponen struktur tersebut ditumpu sederhana).
3. Beban mati W_D termasuk beban mati tambahan W_{SD} termasuk *topping* untuk aksi komposit bekerja.
4. Sebagian besar kehilangan gaya prategang terjadi, sehingga mengakibatkan gaya prategang menjadi tereduksi P_{eff} .
5. Komponen struktur menerima beban kerja penuh, kehilangan gaya prategang jangka panjang akibat rangkai, susut dan relaksasi baja terjadi dan menghasilkan gaya prategang netto P_{eff} .

Metode Desain

Desain menggunakan pendekatan perancangan tegangan kerja. Pada pendekatan ini tegangan di bawah beban kerja dibatasi dengan tegangan ijin dan struktur diasumsikan elastis linier. Salah satu metode yang banyak dipergunakan untuk perancangan penampang balok prategang adalah metode modulus penampang.

Modulus penampang atas,

$$S_t \geq \frac{(1-R)M_0 + M_D + M_L}{R.f_{ti} - f_{cs}} \quad (1)$$

Modulus penampang bawah,

$$S_b \geq \frac{(1-R)M_0 + M_D + M_L}{f_{ts} - R.f_{ci}} \quad (2)$$

dengan:

$$R = 1 - LOF \quad (3)$$

LOF : kehilangan gaya prategang total dalam persentase kehilangan gaya prategang.

M_D : momen akibat beban mati (di luar beban mati yang bekerja saat transfer).

M_0 : momen akibat beban-beban yang bekerja saat transfer.

M_L : momen akibat beban hidup (di luar beban hidup yang bekerja saat transfer)

f_{ti} : tegangan ijin beton serat tarik saat transfer

f_{ci} : tegangan ijin beton serat tekan saat transfer

f_{ts} : tegangan ijin beton serat tarik saat akhir

f_{cs} : tegangan ijin beton serat tekan saat akhir

Pemeriksaan Tegangan

Pada dasarnya pemeriksaan tegangan pada dua keadaan yang berbeda, yaitu :

1. Saat awal (*transfer*), yaitu pemeriksaan tegangan saat pelimpahan gaya prategang (penarikan tendon pada sistem paskatarik, pemotongan tendon pada sistem pratarik). Beban yang diperhitungkan adalah:

a. Gaya prategang awal P_0 (gaya prategang sebelum terjadi kehilangan tegangan / gaya prategang).

b. Beban berat sendiri (M_0)

2. Saat akhir (masa layan / *service*) adalah pemeriksaan pada saat seluruh beban transversal sudah bekerja. Penampang yang digunakan untuk perhitungan propertis yaitu penampang transformasi untuk tendon terekat (*bounded*) dan penampang netto untuk tendon tak terekat (*unbounded*). Beban-beban yang bekerja / diperhitungkan adalah :

a. Gaya prategang efektif P_e (gaya prategang setelah terjadi seluruh kehilangan gaya prategang akibat kehilangan jangka pendek dan jangka panjang

$$P_e = R.P_0. \quad (4)$$

$$R = 1 - LOF \quad (5)$$

dengan,

LOF : kehilangan gaya prategang total, dimana presentase kehilangan prategang untuk paskatarik $\pm 20\%$

b. Seluruh beban eksternal telah bekerja, seperti beban berat sendiri, beban mati dan beban hidup atau dengan momen total yang bekerja saat layan M_T

Tegangan – tegangan akhir di tengah bentang

Pada serat atas,

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{P_e \cdot e \cdot y_a}{I_x} - \frac{M_T \cdot y_a}{I_x} \quad (6)$$

Pada serat bawah,

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{P_e \cdot e \cdot y_b}{I_x} + \frac{M_T \cdot y_b}{I_x} \quad (7)$$

Atau dapat ditulis dengan:

Pada serat atas,

$$f_t = -\frac{P_e}{A_c} + \frac{P_e \cdot e}{S_a} - \frac{M_T}{S_a} \quad (8)$$

Pada serat bawah,

$$f_b = -\frac{P_e}{A_c} - \frac{P_e \cdot e}{S_b} + \frac{M_T}{S_b} \quad (9)$$

Tata Letak Tendon (*Lay Out Tendon*)

Tata letak tendon dipengaruhi oleh besar momen pada setiap titik, yang berarti eksentrisitas tendon e berubah sesuai dengan besar momen. Perencanaan tata letak tendon dilakukan dengan peninjauan sebagai berikut:

1. Batas bawah didasarkan saat transfer, agar tegangan pada serat atas \leq tegangan ijin. Lengan minimum dari kopel tendon,

$$a_{min} = \frac{M_0}{P_i} \quad (10)$$

Batas eksentrisitas bawah,

$$e_b = a_{min} + k_b \quad (11)$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik,

$$e_b' = \frac{f_{ts} \cdot A_c \cdot k_b}{P_i} \quad (12)$$

$$e_{b1} = e_b + e_b' = a_{min} + k_b + e_b \quad (13)$$

2. Batas atas didasarkan saat layan. Jika tendon diletakkan di luar batas ini, maka beban yang dapat dipikul berkurang atau tegangan serat bawah yang terjadi $>$ tegangan ijin.

$$a_{max} = \frac{M_T}{P_e} \quad (14)$$

Batas eksentrisitas bawah,

$$e_t = a_{max} + k_t \quad (15)$$

Pertambahan lebar daerah tendon jika diperbolehkan terjadi tegangan tarik,

$$e_t' = \frac{f_{ts} \cdot A_c \cdot k_t}{P_e} \quad (16)$$

$$e_{t1} = e_t - e_t' = a_{max} - k_t - e_t' \quad (17)$$

Kehilangan Gaya Prategang

Tegangan pada tendon beton prategang berkurang secara kontinyu seiring dengan waktu. Total pengurangan tegangan ini disebut kehilangan prategang total. Kehilangan prategang total ini adalah faktor utama yang mengganggu perkembangan awal beton prategang. Menurut Raju (1993), kehilangan gaya prategang dapat digolongkan menjadi 2,

yaitu kehilangan langsung (*immediate*) dan kehilangan yang bergantung dengan waktu (*time depending lost*).

Kehilangan Gaya Prategang Langsung

Kehilangan gaya prategang langsung dapat diakibatkan oleh beberapa hal, antara lain:

1. Pergeseran angkur (A)

Menurut Lin dan Burns (2000), kehilangan gaya prategang karena slip angkur pada komponen paskatarik diakibatkan adanya blok-blok pada angkur pada saat pendongkrak disalurkan ke angkur. Cara mudah untuk mengatasi kehilangan ini adalah dengan memberikan kelebihan tegangan.

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta A}{L} \cdot E_s \quad (18)$$

dengan,

ΔA : deformasi pengangkuran / slip

E_s : modulus elastik kabel

L : panjang tendon

2. Friksi / gesekan (F)

Kehilangan gaya prategang terjadi pada komponen struktur paskatarik akibat adanya gesekan antara tendon dan beton di sekelilingnya. Besarnya kehilangan ini merupakan fungsi dari formasi tendon atau yang disebut *curvature effect* dan simpangan lokal di dalam alinyemen disebut *wobble effect*. Dengan menggabungkan *curvature effect*, maka :

$$\Delta f_{pF} = f_{pi} \cdot (\phi \cdot \alpha + k \cdot L) \quad (19)$$

dengan,

Δf_{pF} : kehilangan tegangan akibat gesekan kabel

f_{pi} : tegangan awal tendon

L : panjang kabel yang diukur dari ujung kabel ke lokasi x

K : *wobble effect*

Φ : koefisien gesek kabel dan material

α : sudut kabel (radian)

3. Perpendekan elastis beton (ES)

a. Sistem Pratarik

Transfer gaya prategang ke beton mengakibatkan perpendekan elastis pada

beton (*elastic shortening*). Karena tendon yang melekat pada beton di sekitarnya secara simultan juga memendek, maka tendon tersebut akan kehilangan sebagian dari gaya prategang yang dipikulnya.

Perpendekan beton,

$$\delta = \frac{f_c}{E_c} = \frac{P_0}{A_c \cdot E_c} \quad (20)$$

Tegangan beton di pusat berat tendon saat transfer,

$$f_{cs} = \frac{P_i}{A} + \frac{P_i \cdot e^2}{I_x} - \frac{M_G \cdot e}{I_x} \quad (21)$$

Kehilangan prategang akibat perpendekan elastis,

$$\Delta f_{pES} = n \cdot f_{cs} \quad (22)$$

dengan,

P_i : gaya prategang awal

n : modulus ratio antara baja prestess dengan beton balok saat peralihan

M_G : momen akibat berat gelagar beton

I_x : inersia penampang balok

b. Sistem Paska-tarik

Pada sistem paska-tarik, gaya prategang diukur saat tendon diangkur, berarti telah terjadi perpendekan elastis beton.

1) Jika hanya terdapat satu tendon, atau seluruh tendon ditarik bersama-sama/ simultan, maka tidak terjadi kehilangan tegangan akibat perpendekan elastis beton

2) Bila tendon yang digunakan lebih dari satu dan ditarik bertahap, sehingga gaya prategang menekan beton secara bertahap, maka perpendekaan elastis beton bertambah setiap pengukuran tendon. Dengan demikian kehilangan tegangan yang terjadi akan berbeda untuk setiap tendon. Tendon yang pertama kali ditarik akan mengalami kehilangan terbesar, dan tendon yang ditarik terakhir kali tidak mengalami kehilangan tegangan. Untuk mengatasi hal tersebut, dalam praktek digunakan metode:

- a) Seluruh tendon ditarik dengan gaya yang sama (P_0), dan kehilangan tegangan diperhitungkan
- b) Masing-masing tendon ditarik dengan gaya sebesar gaya prategang awal ditambah kehilangan gaya prategang tendon tersebut. Dengan demikian kehilangan tegangan tidak ditinjau lagi. Cara kedua ini dilakukan bila tendon mampu menerima gaya lebih besar.

Jika tendon ditarik bertahap, maka kehilangan tegangan :

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\Delta f_{pES})_j \quad (23)$$

dengan

N : jumlah tendon atau jumlah pasangan tendon yang ditarik secara sekuensial dan j menunjukkan nomor operasi pendongkrakan.

4. Kehilangan Gaya Prategang yang Bergantung dengan Waktu

Kehilangan gaya prategang yang bergantung dengan waktu antara lain :

a. Rangkak pada beton (CR)

Deformasi atau aliran lateral akibat tegangan longitudinal disebut rangkak dan kehilangan hanya terjadi akibat beban yang terus menerus selama riwayat pembebanan suatu elemen struktural.

Kehilangan gaya prategang akibat rangkak didapati persamaan :

Tendon terekat (*bounded*),

$$\Delta f_{pCR} = K_{cr} \cdot \frac{E_s}{E_c} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \text{ atau} \quad (24)$$

$$\Delta f_{pCR} = n \cdot K_{cr} \cdot (f_{cs} - f_{csd})$$

Tendon tak terekat (*unbounded*)

$$\Delta f_{pCR} = n \cdot K_{cr} \cdot f_{cpa} \quad (25)$$

dengan,

K_{cr} : 2,0 untuk komponen struktur pratarik
 : 1,6 untuk komponen struktur paska-tarik
 f_{csd} : tegangan beton pada level pusat berat tendon akibat seluruh beban

mati tambahan yang bekerja pada komponen struktur setelah diberi gaya prategang

f_{cpa} : tegangan tekan rata-rata pada beton sepanjang komponen struktur pada titik berat tendon (tendon tak terekat)

n : modulus ratio antara baja prestess dengan beton balok saat peralihan

b. Susut pada beton (SH)

Untuk komponen struktur paskatarik, kehilangan beton prategang akibat susut agak kecil karena sebagaimana susut telah terjadi sebelum pemberian paskatarik. Metode bergantung waktu untuk kehilangan gaya prategang disebabkan susut adalah :

Metode perawatan basah,

$$\varepsilon_{SH,t} = \frac{t}{t+35} \cdot \varepsilon_{SHu} \quad (26)$$

ε_{SHu} : regangan susut ultimit

: $800 \cdot 10^{-6}$ mm/mm

Kehilangan tegangan akibat susut,

$$\Delta f_{pSH} = \varepsilon_{SH,t} \cdot E_{ps} \quad (27)$$

c. Relaksasi tendon prategang (R)

Relaksasi pada tendon mengalami tegangan tarik dalam waktu yang cukup lama. Besar pengurangan prategang bergantung tidak hanya pada durasi gaya prategang yang ditahan (t), melainkan juga pada rasio antara prategang awal dan kuat leleh baja prategang (f_{pi} / f_{py}).

$$\Delta f_{pR} = f_{pi} \left(\frac{\log t_2 - \log t_1}{45} \right) \cdot \left(\frac{f_{pi}}{f_{py}} - 0,55 \right) \dots \dots \dots (28)$$

dengan,

f_{pi} : tegangan awal tendon

f_{py} : kuat leleh tendon prategang

t_1 : waktu awal interval

t_2 : waktu akhir interval

dari penarikan (*jacking*)

Lendutan (*Deflection*) dan Lawan Lendut (*Chamber*)

Kontrol lendutan dilakukan pada saat transfer dan pada saat servis. Pada saat transfer dimana beban berat sendiri yang bekerja terjadi lendutan keatas yang disebabkan oleh tekanan tendon ke atas pada waktu penarikan kabel

prategang. Lendutan yang terjadi diimbangi oleh beban servis sehingga menimbulkan lendutan pada balok dan diharapkan lendutan yang terjadi tidak melebihi lendutan maksimum yang diijinkan. Menurut SK SNI lendutan maksimum yang diijinkan adalah $L/240$, dimana L adalah panjang bentang balok.

Untuk lendutan ke atas akibat gaya prategang pada simple beam dihitung dengan rumus :

$$\delta_C = \frac{5}{48} \cdot \frac{P_e \cdot e_s \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \quad (29)$$

Untuk lendutan dengan beban merata pada simple beam dihitung dengan rumus :

$$\delta_D = \frac{5}{384} \cdot \frac{w \cdot L^4}{(E_c \cdot I_x)} \quad (30)$$

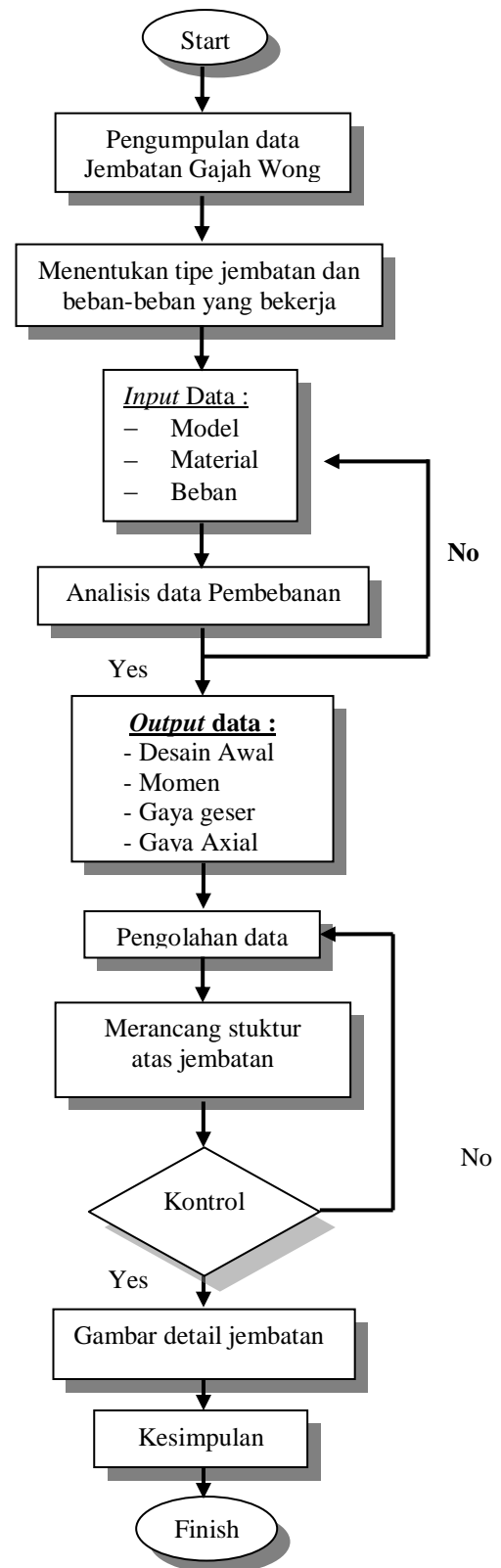
Pada perhitungan lendutan akibat beban transversal dan lawan lendut berlaku prinsip superposisi.

METODE PERANCANGAN

Perancangan struktur atas Jembatan Gajah Wong meliputi perancangan tiang sandaran, slab trotoar, slab lantai kendaraan, dan perancangan balok prategang dengan bentang 40 m. Dalam perancangan Jembatan Gajah Wong digunakan jembatan beton prategang tipe *box girder simple beam*. Adapun tahapan perancangan meliputi :

1. Pengumpulan data Jembatan Gajah Wong,
2. Penentuan spesifikasi struktur jembatan,
3. Perhitungan beban-beban yang bekerja berdasarkan Peraturan Perencanaan Teknik Jembatan (BMS) 1992.
4. Menganalisis struktur dengan menggunakan *Microsoft Excel*.
5. Merancang elemen-elemen struktur dengan beton bertulang dan beton prategang,
6. Menyimpulkan hasil rancangan.

Tahapan perancangan dapat dilihat pada Gambar 1.



GAMBAR 1. Flowchart tahapan perancangan

ANALISIS STRUKTUR DAN PEMBAHASAN

Data Perancangan

Jembatan Gajah Wong dirancang menggunakan struktur balok prategang paskatarik penampang trapesium dengan data sebagai berikut:

1. Panjang total jembatan, $L_t = 40,8$ m
2. Panjang bentang jembatan, $L = 40$ m
3. Jumlah box girder, $n = 1$ buah
4. Lebar trotoar, $b_2 = 0,50$ m
5. Lebar jalan, $b_1 = 6,00$ m
6. Tebal genangan air hujan, $t_h = 0,05$ m
7. Tebal trotoar, $t_t = 0,30$ m
8. Tebal aspal, $t_a = 0,10$ m

*Analisis Struktur Atas*a. **Perhitungan tiang sandaran (railing)**

Didapatkan hasil perhitungan sebagai berikut:

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

$$y = 1,2 \text{ m}$$

$$M_{TP} = 1,8 \text{ kNm}$$

$$K_{TP} = 2$$

$$M_u = 3,6 \text{ kNm}$$

$$V_u = 3 \text{ kN}$$

$$P_{MS} = 16,578 \text{ kN}$$

$$M_{MS} = 9,6489 \text{ kNm}$$

Penulangan tiang sandaran menggunakan pelat beton ukuran 150 mm, dengan tulangan pokok D13-190 dan tulangan susut D10-260 mm.

b. **Perhitungan Plat lantai Jembatan**

Penulangan plat lantai jembatan dengan tulangan pokok D19-100, tulangan susut D13-200mm,

c. **Perhitungan plat injakan jembatan**

Plat injakan arah memanjang dan melintang diperoleh perhitungan: $DLA = 0,425$, $T_{TT} = 142,5$ kN, $h = 0,3$ m, $t_a = 0,05$ m, $s = 0,5$ m, $b' = 0,55$ m, $f'_c = 24,9$ MPa, angka poisson = 0,2, $ks = 81500 \text{ kN/m}^3$, $E_c = 27629840 \text{ kN/m}^2$, $r = 0,275$, $M_{max} = 30,1176$ kNm, $M_u = 60,2352$ kNm, penulangan menggunakan D16-200.

d. **Perhitungan balok prategang**

Beban-beban yang bekerja:

$W_G = 200$ kN/m, berat sendiri balok = 260 kN/m, beban railing = 21,557 kN/m, beban

mati tambahan = 21,112 kN/m, $M_{SnTotal}$ beban mati = 42,6647 kN/m, beban hidup (T_D); $Q_{TD} = 85,329$ kN/m, $P_{TD} = 721,05$ kN, $L = 40$ m, $M_G = 52000$ kNm, $M_{MS} = 7070,375$ kNm, $M_{TD} = 23310,5$ kNm, $St = 2,0494$ m³, $Sb = 2,4895$ m³, $Cb = 1,410$ m, $H = 2,5$ m.

Propertis penampang box girder; $H = 2,5$ m, $Cb = 1,2469$ m, $Ct = 1,253$ m, $I_b = 15,9593$ m⁴, $I_x = 5,025$ m⁴, $Sa = 4,010$ m³, $Sb = 4,035$ m³, $r_2 = 0,7185$ m, $Ka = 0,576$ m, $Kb = 571$ m.

e. **Gaya prategang, eksentrisitas dan jumlah tendon**

Gaya prategang dan eksentrisitas yaitu : $A = 7,032$ m², $Sa = 7,6855$ m³, $Sb = 7,3793$ m³, $z_o = 0,35$ m, $e_s = 0,896$ m, $M_{bs} = 35863,2$ kNm, $P_t = 35863,2$ kNm, $P_t = 89933,539$ kNm.

Jumlah tendon : 28 tendon, jumlah strands = 1344 strands, ukuran 101,6 mm.

f. **Tendon**

1) Daerah aman tendon didapat analisis : $W_G = 179,316$ kN/m, $M_G = 35863,2$ kNm, $Q_{MS} = 204,449$ kN/m, $M_{MS} = 40899,8$ kNm, $M_{TD} = 11655,3$ kNm, $P_0 = 8933,539$ kN, perhitungan momen di bagian lain di Tabel 1. Batas bawah tendon pada Tabel 2. Batas atas tendon pada Tabel.3.

2) **Tata letak tendon**

a) Posisi di tengah bentang di Gambar 2. $z_1 = 0,55$ m, $z_2 = 0,4167$ m, $z_3 = 0,2833$ m, $z_4 = 0,15$ m,

b) Posisi tendon di tumpuan di Gambar 3. Jarak masing-masing baris tendon terhadap alas; $z_1' = 1,8469$ m, $z_2' = 1,4469$ m, $z_3' = 1,04691$ m, $z_4' = 0,6469$ m.

c) Eksentrisitas masing-masing tendon: $f_1 = 1,2969$ m, $f_2 = 1,03025$ m, $f_3 = 0,7635$ m, $f_4 = 0,4969$ m.

d) Lintasan inti tendon (cable) di Gambar 4.

e) Sudut angkur di Tabel 4.

f) Tata letak kabel tendon di Tabel 5.

TABEL 5. Tata letak kabel tendon

Jarak X (m)	Trace z_0 (m)	Posisi Baris Tendon			
		z_1 (m)	z_2 (m)	z_3 (m)	z_4 (m)
0.00	1.0469	1.8469	1.4469	1.0469	0.6469
1.00	0.9725	1.7205	1.3465	0.9725	0.5985
2.00	0.9018	1.6005	1.2512	0.9018	0.5525
3.00	0.8350	1.4870	1.1610	0.8350	0.5090
4.00	0.7720	1.3800	1.0760	0.7720	0.4680
5.00	0.7129	1.2795	0.9962	0.7129	0.4295
6.00	0.6575	1.1855	0.9215	0.6575	0.3935
7.00	0.6059	1.0979	0.8519	0.6059	0.3599
8.00	0.5582	1.0169	0.7876	0.5582	0.3289
9.00	0.5143	0.9423	0.7283	0.5143	0.3003
10.00	0.4742	0.8742	0.6742	0.4742	0.2742
1.00	0.4380	0.8126	0.6253	0.4380	0.2506
12.00	0.4055	0.7575	0.5815	0.4055	0.2295
13.00	0.3769	0.7089	0.5429	0.3769	0.2109
14.00	0.3521	0.6667	0.5094	0.3521	0.1947
15.00	0.3311	0.6311	0.4811	0.3311	0.1811
16.00	0.3139	0.6019	0.4579	0.3139	0.1699
17.00	0.3005	0.5792	0.4398	0.3005	0.1612
18.00	0.2910	0.5630	0.4270	0.2910	0.1550
19.00	0.2852	0.5532	0.4192	0.2852	0.1512
20.00	0.2833	0.5500	0.4167	0.2833	0.1500

TABEL 6. Total kehilangan gaya prategang

No	Level Tegangan	Tegangan Baja (Mpa)	Persentase (%)
		Setelah Penegangan	621.4500
	Kehilangan tegangan :		
1	Pergeseran ankur (<i>anchorage friction</i>)	28.5000	4.586%
2	Gesekan kabel (<i>jack friction</i>)	27.7505	4.465%
3	Perpendekan elastis beton (<i>elastic shortening</i>)	46.2504	7.442%
4	Rangkak beton (<i>creep</i>)	146.4955	23.573%
5	Susut beton (<i>shrinkage</i>)	70.1538	11.289%
6	Relaksasi tendon (<i>relaxation of tendon</i>)	-7.3073	-1.176%
	Beban mati tambahan :		
1	Beban mati tambahan topping	7.1804	1.155%
	Tegangan Akhir (f_{pe})	316.7874	50.976%
	Kehilangan Tegangan Total (<i>loss of prestress</i>)		49.024%

g. **Kehilangan Gaya Prategang (*Loss of Prestress*)**

Kehilangan Prategang Jangka Pendek :

$$\Delta f_{pA}=28,5 \text{ MPa}, \Delta f_{pF}=7,7504 \text{ MPa}, f_{csd}$$

$$= 1,4766 \text{ MPa}, \Delta f_{pCR}=146,4954 \text{ MPa},$$

$$\Delta f_{pSD}=7,1803 \text{ MPa}$$

Kehilangan Prategang Jangka Panjang

$$\Delta f_{pCR}=146,4954 \text{ MPa}, \Delta f_{pSD}=7,1803$$

$$\text{MPa}, \Delta f_{pSH}=70,1538 \text{ MPa}, \Delta f_{pR}=-$$

7,307 MPa. Kehilangan tegangan total = 49,025 % (Tabel 6).

h. **Tegangan yang Terjadi Akibat Gaya Prategang**

1. Keadaan Awal (Transfer)

Tegangan pada serat atas:

$$f_t = -2,037 \text{ MPa} < f_{ci} = 24 \text{ MPa}$$

Tegangan pada serat bawah:

$$f_b = -23,54 < f_{ci} = 24 \text{ MPa}$$

2. Keadaan Akhir (*Service*)

Tegangan pada serat atas:

$$f_t = -12,597 \text{ MPa} < f_{cs} = 22,5 \text{ MPa}$$

Tegangan pada serat bawah:

$$f_b = -2,527 \text{ MPa} < f_{cs} = 22,5 \text{ MPa}$$

i. **Tinjauan Ultimate Box girder Prategang**

Momen ultimate box girder prategang,

$$\begin{aligned} M_u &= \phi \cdot M_n \\ &= 0,8 \cdot 443749,016 \\ &= 354999,2128 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Kontrol momen kapasitas,

$$\begin{aligned} M_k &= \phi \cdot M_u \\ &= 0,8 \cdot 354999,2128 \\ &= 283999,37024 \text{ kNm} \end{aligned}$$

j. **Lendutan $\delta_T = 0,01337$ m (\downarrow) ke bawah. Lendutan maksimum yang diijinkan,**

$$\delta = \frac{L}{240} = \frac{40}{240} = 0,1667 \text{ m} > \delta_T = 0,01337 \text{ m}$$

k. **Endblock**

Angkur yang digunakan yaitu angkur tegangan VSL tipe E5-45 Jumlah strand dalam 1 tendon = 48, Beban putus 1 strand, Pbs 1 strand = 187,32 kN, Beban putus 1 tendon, Pbs 1 tendon = 3778,720 kN, a = 130 mm

$$H \text{ balok} = 2,5 \text{ m}, T = 895,556 \text{ kN} = 895556,676 \text{ N}, f_y = 234 \text{ MPa}$$

Tulangan angkur yang digunakan, =

$$\frac{A_s}{A_{ID}} = \frac{3827,165}{402,124} = 9,517 = 10 \text{ buah,}$$

maka digunakan tulangan angkur 10 D16.

Pembahasan

Berdasarkan hasil analisis struktur atas Jembatan Gajah Wong menggunakan box girder tipe trapesium dapat diketahui :

1. Penulangan tiang sandaran direncanakan menggunakan pelat beton ukuran 150 mm, dengan tulangan pokok D13-190 dan tulangan susut D10-260 mm.
2. Sistem plat lantai menggunakan plat satu arah dengan ketebalan 300 mm, tulangnya menggunakan tulangan pokok D19-100 mm dan tulangan susut D13-200 mm.
3. *Box girder* pada perancangan struktur baloknya menggunakan balok prategang *full-prestress* paska-tarik dengan penampang *box* trapesium dengan tinggi 2,5 m.

4. Untaian kawat (*strand*) untuk sistem prategang menggunakan *strand* 7 kawat yang sesuai dengan spesifikasi ASTM A-416 dan angkur yang digunakan yaitu angkur tegangan VSL tipe E-43 dengan jumlah tendon 28 buah.

5. Pemeriksaan tegangan beton pada saat transfer pada serat atas dari perhitungan didapatkan $f_t = -2,037 \text{ MPa}$ lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $f_{ci} = -24 \text{ MPa}$ dan pada serat bawah didapatkan $f_b = -23,54$ lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $f_{ci} = -24 \text{ MPa}$ maka tegangan beton pada saat transfer dinyatakan aman.

6. Untuk tegangan beton yang terjadi pada saat layan yang terjadi pada serat atas $f_t = -12,597 \text{ MPa}$ lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $f_{cs} = -22,5 \text{ MPa}$ dan pada serat bawah $f_b = -2,527 \text{ MPa}$ lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $f_{cs} = -22,5 \text{ MPa}$, maka struktur beton prategang dinyatakan aman.

KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan di atas dapat disimpulkan bahwa :

1. Struktur atas Jembatan Gajah Wong menggunakan *box girder prestressed* bentang sederhana.
2. Tiang sandaran jembatan menggunakan tulangan pokok D13-190 dan tulangan susut mm D10-260 mm. Karena nilai $\phi \cdot V_c = 8607,73 \text{ N} > V_u = 3000 \text{ N}$, maka beton tidak perlu diberi tulangan geser sebab beton telah mampu menahan gaya geser yang terjadi.
3. Plat lantai (*slab*) jembatan menggunakan plat satu arah dengan ketebalan 300 mm, tulangnya direncanakan menggunakan tulangan pokok D19-100 mm dan tulangan susut D13-200 mm
4. Gelagar dengan struktur beton prategang dengan menggunakan profil penampang berbentuk *box girder* tipe trapezium. Pada perancangan struktur baloknya menggunakan balok prategang *full-prestress* paska-tarik dengan penampang *box* trapesium dengan tinggi 2,5 m,

tegangan beton pada saat transfer dinyatakan aman.

5. Untuk tegangan beton yang terjadi pada saat layan yang terjadi pada serat atas $f_t = -12,597\text{MPa}$ lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $f_{cs} = -22,5\text{ MPa}$ dan pada serat bawah $f_b = -2,527\text{MPa}$ lebih kecil dari tegangan yang diijinkan $f_{cs} = -22,5\text{MPa}$, maka struktur beton prategang dinyatakan aman.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim (2010). *Perencanaan teknik Jembatan*, Direktorat Bina Teknik, Jakarta
- Kadir Aboe, A. (2006). *Struktur Beton Prategang*, Yogyakarta
- Lin, T.Y. dan Burns, Ned H. (2000). *Disain Struktur Beton Prategang*, Jilid 1 dan 2 terjemahan Mediana Sianipar, Interaksara.
- Nasution, Amrinsyah (2009). *Analisis dan Disain Struktur Beton Bertulang*, Bandung : Penerbit ITB.
- Nawy, Edward G. (2001), *Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar* Jilid 1 dan 2 terjemahan Bambang Suryoatmono, Jakarta: Erlangga.
- Raju, N. Krishna (1993). *Beton Prategang* Edisi II, Jakarta: Erlangga.

PENULIS:

Sentot Hardwiyono✉, Bagus Soebandono

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Lingkar Selatan, Bantul 55183, Yogyakarta.

✉Email: sentot_hardwiyono@yahoo.com

Lukmanul Hakim

Alumni Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Lingkar Selatan, Bantul 55183, Yogyakarta.