

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN KALIKETHEK MENGGUNAKAN *SINGLE CELL BOX GIRDER* BETON PRATEGANG

Zahra El Himmah¹ & Utari Khatulistiandi^{2*}

^{1,2} Program studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Wijaya Kusuma Surabaya, Surabaya
Jl. Dukuh Kupang XXV No. 54, Dukuh Kupang, Kec. Dukuhpakis, Surabaya, Jawa Timur 60225

E-mail: zahraelhimmah@gmail.com¹ & utari.kh@uwks.ac.id^{2*}

(*) Penulis Korespondensi

(Artikel dikirim: 15 April 2025, Direvisi: 16 April 2025, Diterima: 9 Desember 2025)

DOI: <http://dx.doi.org/10.30742/axial.v13i3.4349>

ABSTRAK: Jembatan Kalikethok berada di sungai Bengawan Solo, merupakan akses jalan dari Kabupaten Bojonegoro menuju Kabupaten Tuban dengan bentang total 209,76 meter yang terbagi dalam 4 segmen, yaitu 59,92 meter, 44,95 meter, 44,95 meter, dan 59,94 meter. Eksisting struktur atas menggunakan struktur rangka batang tipe *Warrant Trust* dengan lebar jalan 7 meter. Perencanaan ulang struktur atas jembatan tersebut pada segmen bentang 59,94 meter, menggunakan struktur beton prategang *box girder tipe Single Cell*, dan diperlebar menjadi 9 meter. Perencanaan dilakukan dengan tujuan mendesain ulang jembatan Kalikethok menggunakan *box girder* sesuai dengan acuan SNI yang telah ditetapkan. Hasil desain diperoleh tinggi *single cell box girder* 2,5 m, lebar atas 9 m dan lebar bawah 4,5 m dengan ketebalan 50 cm. Jumlah tendon yang diperlukan adalah 24 buah menggunakan jenis *strand uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270*. Setelah dilakukan cek kekuatan, diperoleh hasil perencanaan *box girder* telah mampu menahan beban bekerja. Hal ini diketahui dari analisa kehilangan gaya prategang yang terjadi pada *box girder* sebesar 22,465% lebih kecil dari syarat izin sebesar 25%. Tegangan pada kondisi akhir pada serat atas sebesar 22,76 MPa dan pada serat bawah 35,31 MPa, lebih kecil dari tegangan ijin serat atas 30 MPa dan serat bawah 3,88 MPa. Lendutan yang terjadi sebesar 6,8 mm (lendutan ke bawah), lebih kecil dari batas lendutan ijin sebesar 229 mm. Maka dapat disimpulkan bahwa Jembatan Kalikethok dapat didesain ulang menggunakan *single cell box girder* beton prategang.

KATA KUNCI : *beton prategang, Jembatan Kalikethok, single cell box girder*

1. PENDAHULUAN

Beton konvensional memiliki sifat kuat tekan namun lemah pada kondisi tarik yang hanya berkisar 9%-15% dari kuat tekannya. Hal tersebut akan berpengaruh pada risiko terjadinya retakan lentur pada kondisi pembebaan yang lemah. Dalam pengembangan ilmu, untuk mengatasi hal tersebut, maka dibutuhkan beton dengan kemampuan menahan gaya tarik yang lebih besar tetapi dengan dimensi yang kecil karena mutu dari komponen material yang tinggi sehingga ditemukanlah beton prategang. Perbedaan beton prategang dengan beton konvensional mengkombinasikan antara beton dan tulangan baja sehingga keduanya bekerja sama dalam menahan beban sesuai dengan perencanaan. Beton prategang merupakan kombinasi beton dan baja dengan cara aktif yaitu dengan cara menarik baja dan menahannya ke beton yang membuat beton berada dalam keadaan tertekan sehingga menghasilkan perilaku yang lebih baik daripada beton yang

dikombinasikan dengan tulangan baja (Lin & Burns, 2000).

Pada dasarnya beton prategang adalah beton dengan tegangan-tegangan internal yang besar serta distribusi yang sesuai diberikan sedemikian rupa sehingga tegangan yang diakibatkan beban luar dilawan sampai suatu tingkat yang diinginkan (Krishna Raju, 2020).

Penggunaan beton prategang membutuhkan biaya yang lebih besar karena kebutuhan sistem dalam pemberian prategang menjadi hal yang disayangkan untuk beberapa kasus. Akan tetapi pengeluaran yang besar di awal pelaksanaan akan terbayar dengan kebutuhan pemeliharaan yang lebih murah dikarenakan rentang waktu daya guna yang lebih lama akibat kontrol kualitas lebih baik dari beton konvensional.

Jembatan adalah bangunan konstruksi yang menghubungkan antar daratan terpisah karena kondisi geografis, seperti sungai, danau, atau bahkan laut, sehingga memungkinkan untuk dilewati oleh makhluk hidup dengan atau tanpa



PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN KALIKETHEK MENGGUNAKAN *SINGLE CELL BOX GIRDER* BETON PRATEGANG

(Zahra El Himmah & Utari Khatulistiiani)

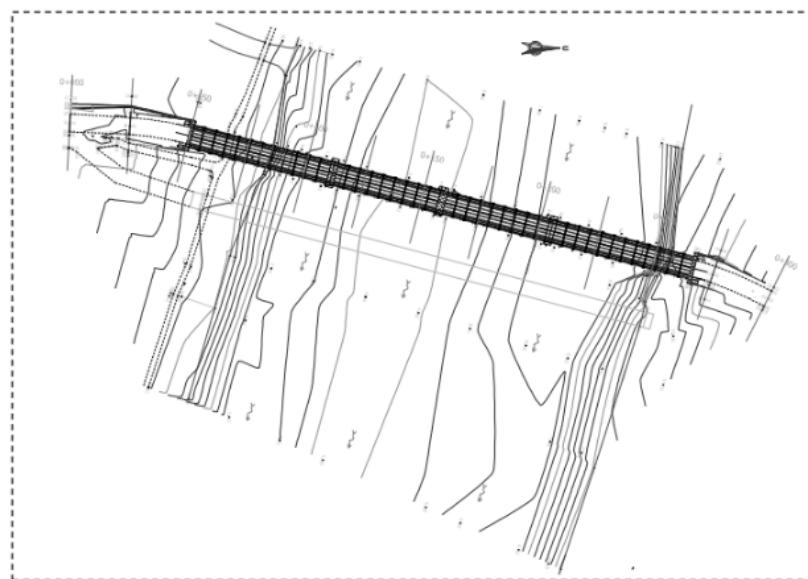
media perantara. Menurut sejarah, jembatan tidak dicetuskan secara individu, melainkan berkembang sesuai dengan waktu dan teknologi secara kolaboratif. Teknik pembangunan jembatan dikembangkan berjalanannya era dan zaman oleh berbagai pemikiran dan beberapa metode empiris untuk keberhasilan tertentu dalam perencanaan. Adanya pembangunan jembatan menunjukkan perkembangan pembangunan infrastruktur yang dapat menunjang perkembangan dan pertumbuhan kebutuhan pasar dan dunia ekonomi (Supriyadi & Muntohar, 2007).

Jembatan beton prategang merupakan jembatan dengan bahan material beton disertai kabel-kabel dari kawat baja yang bertujuan untuk memberikan tambahan kuat tegangan pada material yang digunakan pada perencanaan jembatan. Kekuatan dan tingkat kestabilan tinggi yang dimiliki beton prategang disebabkan oleh sistem prategang.

Jembatan Kali Kethok berada di Kabupaten Bojonegoro yang menjadi salah satu penghasil minyak dan gas bumi terbesar di Indonesia (Sugeng, 2023). Jembatan Kali Kethok terbentang melintasi sungai Bengawan Solo, terletak di Kecamatan Trucuk Kabupaten Bojonegoro, yang menghubungkan Kabupaten Bojonegoro dengan Kabupaten Tuban. Menurut pemerhati sejarah R. Ngastasio Kertonegoro, jembatan Kalikethok dibangun pada tahun 1916 dan selesai pada tahun 1919 (Midaada, 2022).

Jembatan memiliki panjang 129 m dengan lebar 7,6 meter, dibangun menggunakan sistem rangka baja tipe *Warren Trust*, bentang total jembatan adalah 209,76 meter yang dibagi sebanyak empat segmen, masing-masing dengan panjang 59,92 m, 44,95 m, 44,95 m dan 59,94 m. Denah eksisting jembatan ditampilkan pada **Gambar 1**. Perencanaan ulang ini mendesain struktur atas jembatan Kali Kethok bentang 59,94 meter dan lebar yang semula 7 meter menjadi 9 meter, menggunakan struktur beton prategang *single cell box girder*. Pemilihan tipe *single cell box girder* dengan tujuan bahwa pelaksanaan pemasangannya praktis dan pemeliharaannya yang mudah. Selain itu dapat menahan beban dengan baik pada bentang yang mencapai hampir 60 meter. Penggunaan girder dalam pembangunan jembatan ditentukan dari kebutuhan dan kondisi lahan jembatan tersebut. *Box Girder* dapat tersusun dari bahan komposit maupun nonkomposit. *Box Girder* mulai banyak digunakan di Indonesia karena pemasangannya yang relatif mudah dengan daya tahan yang lebih lama (Apriyanto & Siswoyo, 2021).

Perumusan masalah dalam perencanaan jembatan Kali Kethok ini adalah berapa dimensi *single cell box girder* yang dibutuhkan pada segmen panjang 59,94 meter dan lebar yang diubah menjadi 9 meter. Juga untuk menganalisa berapa jumlah tendon yang dibutuhkan pada *box girder*.



Gambar 1. Denah Eksisting Jembatan Kalikethok
(Sumber: Arsip Dinas Bina Marga Pekerjaan Umum Provinsi Jawa Timur)



Gambar 2. Diagram Alir Perencanaan Jembatan Kali Kethok
(Sumber: Penulis)

2. METODE PERENCANAAN

Perencanaan dilakukan dengan urutan seperti diuraikan pada diagram alir **Gambar 2**. Perencanaan ulang jembatan ini dengan bentang 59,94 meter, lebar jembatan 9 meter, dan lebar trotoar 0,5 meter. Struktur girder jembatan didesain menggunakan beton prategang *box girder* tipe *single cell*.

Perencanaan beban jembatan mengacu pada SNI 1725-2016, yaitu beban mati akibat berat sendiri dan beban mati tambahan atau utilitas. Beban hidup terdiri dari beban lajur D, beban truk T, gaya rem, beban angin dan beban gempa. Desain beton prategang mengacu pada peraturan SNI 2847-2019.

Plat lantai kendaraan dicor di tempat, oleh karena itu *box girder* beton prategang didesain berupa

balok *precast*. Hal ini berpengaruh pada metode penarikan kabel beton prategangnya, yaitu menggunakan metode *post-tension* (pascatarik), dimana penarikan kabel dilakukan saat beton girder *precast* telah berada di lokasi pekerjaan.

3. PERENCANAAN STRUKTUR SEKUNDER

3.1 Perencanaan Tiang Sandaran

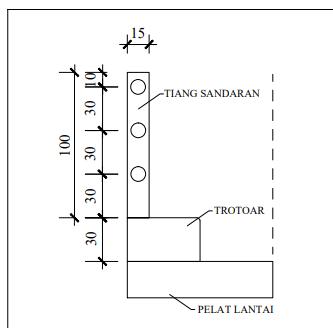
Tiang sandaran direncanakan dengan spesifikasi: tinggi tiang = 100 cm, dimensi tiang = 15 cm x 15 cm (Gambar 3). Mutu beton (f'_c) = 30 MPa, mutu baja tulangan (F_y) = 280 MPa. Diameter pipa sandaran = 76,3 mm, mutu baja pipa BJ 37. Momen lentur M_n diperoleh 4000 Nm, dan gaya geser = 3200 N. Digunakan tulangan utama 4D10 mm, dan tulangan sengkang D8- 90 mm.

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN KALIKETHEK MENGGUNAKAN *SINGLE CELL BOX GIRDER* BETON PRATEGANG

(Zahra El Himmah & Utari Khatulistiarni)

3.2 Perencanaan Plat Trotoar

Plat trotoar direncanakan dengan spesifikasi: tebal trotoar = 30 cm, lebar trotoar = 50 cm (**Gambar 3**). Mutu beton ($f'c$) = 30 MPa. Beban mati trotoar akibat berat sendiri, beban scret, dan beban air hujan diperoleh total $q_d = 8600 \text{ N/m}^2$. Berat tiang sandaran 243 N. Diperoleh momen lentur nominal $M_n = 25375 \text{ Nm}$. Tulangan utama digunakan tulangan rangkap D13-200 mm ($A_s = 663,7 \text{ mm}^2$), dan tulangan susut D8-160 mm ($A_s = 314,20 \text{ mm}^2$).



Gambar 3. Tiang Sandaran dan Trotoar
(Sumber: Penulis)

3.3 Perencanaan Plat Lantai Kendaraan

Penulangan plat lantai kendaraan direncanakan menggunakan *one way slab* (penulangan satu arah). Tebal pelat = 30 cm, tebal selimut beton 4

cm, mutu beton (f'_c) = 30 MPa, mutu baja tulangan (F_y) = 280 MPa. Total beban mati terdiri dari berat sendiri, berat *scret* dan beban air hujan diperoleh $qD = 910 \text{ kg/m}^2$.

Nilai momen diperoleh:

$$Mlx = +0,001 \times q \times Lx^2 \times C = 24460,80 \text{ Nm}$$

$$M_{Tx} = -0,001 \times q \times Lx^2 \times C = -48339,20 \text{ Nm}$$

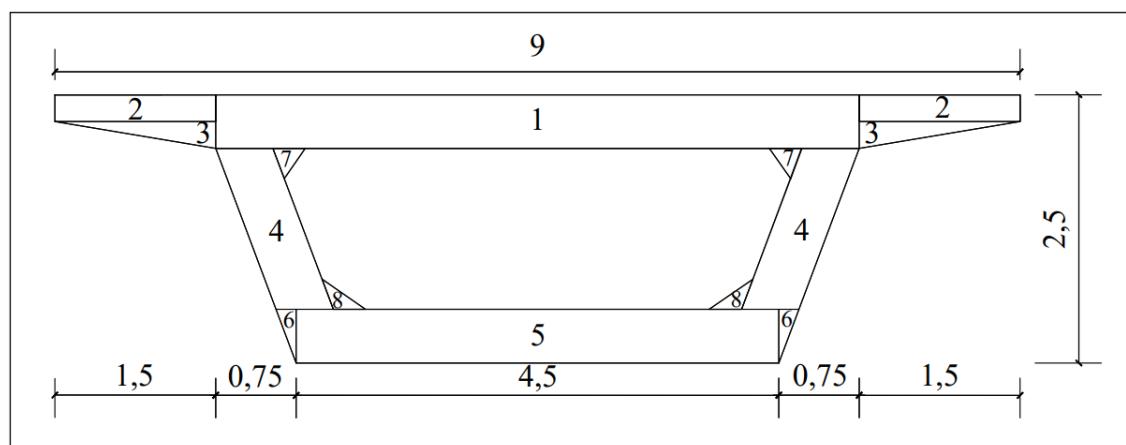
Beban hidup muatan $T = 1,8 \times 30\%$ (SNI 1725 – 2016 Hal 41 Pasal 8.4) beban hidup total = $263,25 \text{ kN/m}^2$.

Digunakan tulangan utama berupa tulangan rangkap D13-100 mm, dan tulangan susut D13-200 mm.

4. STRUKTUR PRIMER *BOX GIRDER*

4.1 Penampang Box Girder

Gelagar utama jembatan direncanakan menggunakan *box girder* dengan ukuran seperti pada **Gambar 4**. Diasumsikan gelagar cukup kuat untuk menahan gaya tekan dan gaya geser terhadap beban yang terjadi. Ukuran *box girder* tersebut ditentukan dari hasil *preliminary design*. Mutu beton *box girder* menggunakan $f'c = 60$ MPa, mutu baja tulangan (F_y) = 420 MPa. Diameter tulangan utama = 22 mm, diameter tulangan sengkang = 13 mm. Panjang gelagar 59,94 meter. Luas penampang *box girder*, A_c ditentukan menggunakan **Tabel 1**, dan diperoleh $A_c = 7,873 \text{ m}^2$.



Gambar 4. Ukuran Penampang *Box Girder*
(Sumber: Penulis)

Tabel 1. Perhitungan Luas Penampang *Box Girder*

No	Dimensi	Jumlah	Luas (m ²)
	b (m)	h (m)	
1	6	0,5	1
2	1,5	0,25	1
3	1,5	0,25	2
4	0,5	1,6	2
5	4,5	0,5	1
6	0,5	0,19	2
7	0,35	0,25	2
8	0,5	0,18	2
Total luas			7,873

(Sumber: Hasil analisis data penulis)

4.2 Analisis Pembebaan *Box Girder*

Hasil analisis pembebaan *box girder* beton prategang diuraikan pada Tabel 2. Beban dari berat sendiri sebesar 200,77 kN/m; beban mati tambahan sebesar 19,72 kN/m; beban merata lajur D sebesar 45,59 kN/m dan beban terpusat sebesar 459,8 kN; beban gaya rem sebesar 431,2 kNm; beban angin sebesar 2,016 kN/m; dan beban gempa sebesar 22,05 kN/m.

4.3 Analisis Penampang Balok Prategang

Luas penampang balok prategang, $A_c = 7,873$ m². Letak titik berat balok adalah $Y_b = 1,6$ m dan $Y_t = 0,9$ m. Momen inersia terhadap alas balok,

$I_b = 24,053$ m² dan momen inersia terhadap titik berat balok, $I_x = 3,899$ m⁴. Statis momen pada bagian atas, $S_t = 4,33$ m³ dan bagian bawah, $S_b = 2,44$ m³. Penentuan batas inti (*kern*) balok prategang pada bagian atas adalah $K_t = 0,310$ m dan bagian bawah adalah $K_b = 0,551$ m.

4.4 Gaya Prategang Izin yang Terjadi

Dalam perencanaan, gaya prategang izin yang terjadi ditentukan berdasarkan SNI 2847:2019 pasal 24.5.3.2 sebagai berikut:

Tegangan awal

Tarik: $f_{ti} = 0,25\sqrt{f_{ci}} = 0,25\sqrt{48} = 4,157$ MPa

Tekan: $f_{ci} = 0,6 f_{ti} = 0,6 \times 48 = 28,8$ MPa

Tegangan akhir

Tarik: $f_t = 0,5\sqrt{f_c} = 0,5\sqrt{60} = 3,88$ MPa

Tekan: $f_c = 0,45f_t = 0,45 \times 60 = 30$ MPa

4.5 Perencanaan Tendon

Perhitungan Jumlah Tendon

Gaya prategang awal, $F_o = 109895$ kN

Kabel prategang digunakan tipe *strands uncoated 7 wire super strands ASTM A-416 grade 270*.

Beban putus min 1 *strands*, $P_{bs} = 187,32$ kN.

Tegangan izin tendon sesaat setelah transfer, $f_{pi} = 1296,42$ MPa.

Luas area baja prategang yang diperlukan:

$$A_s = \frac{F_o}{f_{pi}} = 84768,053 \text{ mm}^2$$

Tabel 2. Rekapitulasi Pembebaan Balok Prategang

No	Jenis Beban	Kode Beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)	Keterangan beban
1.	Berat sendiri	Q_{bs}	200,77			Merata
2.	Beban mati tambahan	Q_{MA}	19,72			Merata
3.	Beban lajur D	Q_{TD}	45,59	459,8		Merata dan terpusat
4.	Gaya rem	Q_{TB}			431,2	Merata
5.	Beban angin	Q_{EW}	2,016			Merata
6.	Beban gempa	Q_{EQ}	22,05			Merata

(Sumber: Hasil analisis data penulis)

Beban putus minumun satu tendon

$$P_{bs1} = P_{bs} \times \text{jumlah strands per tendon} = 7118,160 \text{ kN}$$

Jumlah tendon yang diperlukan:

$$n_t = F_o / 0,85 \times 0,8 \times P_{bs}$$

$$= \frac{109895}{0,85 \times 0,8 \times 7118,160} = 22,70 \text{ tendon, maka digunakan 24 tendon.}$$

4.6 Penentuan Letak Tendon

Hasil perhitungan letak tendon diuraikan pada Tabel 3. Lintasan tendon menggunakan rumusan:

$$Y = 4 \times f \times \frac{X}{L^2} (L - X), f = e_s \quad (1)$$

Diperoleh nilai pada jarak 0, $x_o = 0,26$ meter
Eksentrisitas pada jarak 0, $e_o = 0,027$ meter

4.7 Tata Letak Tendon

Ditentukan menggunakan rumusan:

$$z_i = z_i' - 4 \times f \times \frac{X}{L^2} (L - X) \quad (2)$$

Diperoleh hasil tata letak tendon seperti pada **Gambar 5** untuk di tengah bentang, dan **Gambar 6** di ujung balok. *Trace Cable* prategang terbentang dari ujung ke ujung,

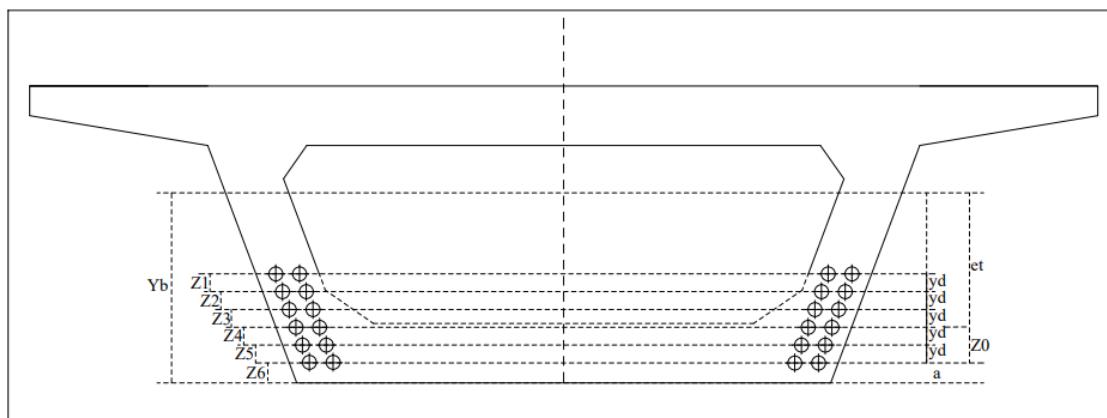
**PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN KALIKETHEK
MENGGUNAKAN *SINGLE CELL BOX GIRDER* BETON PRATEGANG**
(Zahra El Himmah & Utari Khatulistiarni)

ditampilkan pada **Gambar 7** setengah bentang
dari seluruh *trace cable* prategang.

Tabel 3. Tata Letak Tendon

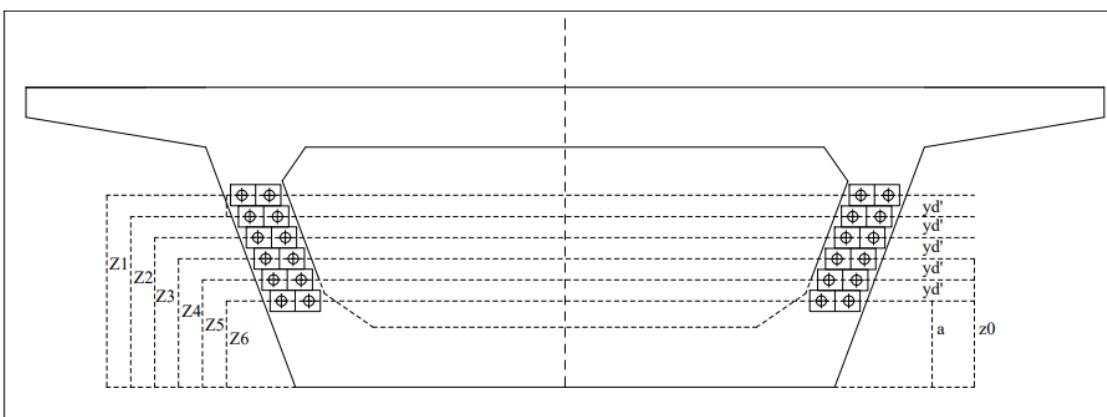
Baris	Tengah Bentang (m)	Ujung Bentang (m)
1	0,9	2
2	0,75	1,82
3	0,6	1,64
4	0,45	1,46
5	0,3	1,28
6	0,15	1,1

(Sumber: Hasil analisis data penulis)



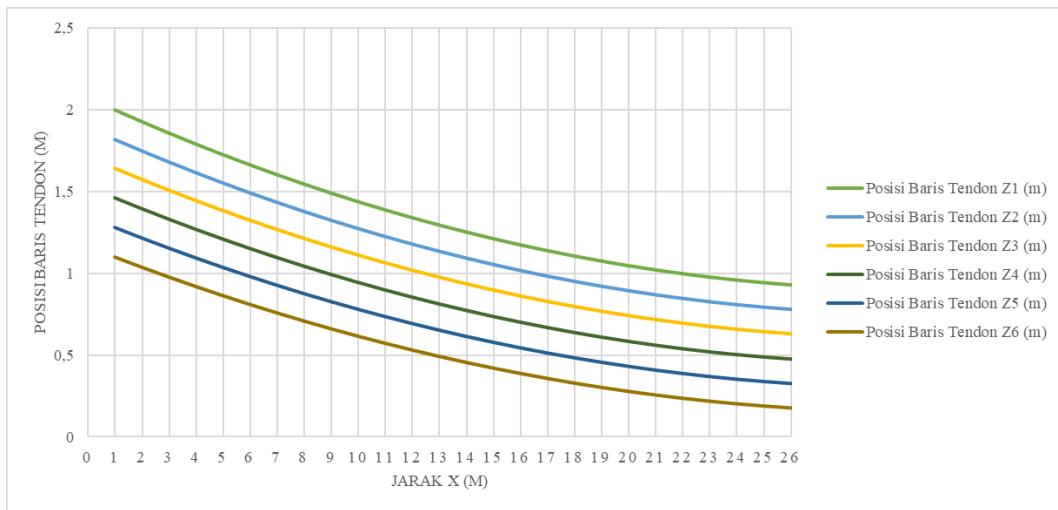
Gambar 5. Tata Letak Tendon di Tengah Bentang Balok

(Sumber: Penulis)



Gambar 6. Tata Letak Tendon di Ujung Balok

(Sumber: Penulis)



Gambar 7. Trace Cable Prategang dari Ujung sampai Tengah Bentang
(Sumber: Hasil analisis data penulis)

4.8 Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang dibagi menjadi dua bagian, yaitu kehilangan elastis yang terjadi seasaat setelah dilakukannya jacking (kehilangan akibat perpendekan elastis, akibat gesekan, akibat slip), dan kehilangan bergantung waktu (kehilangan akibat rangkak, susut dan relaksasi baja).

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

Ditentukan menggunakan persamaan

$$ES = \frac{n \times F_1}{A_c} \quad (3)$$

Diperoleh: $ES_1 = 21,7 \text{ MPa}$

Kehilangan rata-rata gaya prategang

$$ES = 0,5 \times ES_1 = 10,85 \text{ MPa}$$

Persentase kehilangan gaya prategang ES

$$\%ES = \frac{ES}{f_c} \times 100 = 0,58\%$$

b. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Gesekan pada Tendon (FR)

Ditentukan menggunakan persamaan:

$$Ps = P_o(KL + \mu\alpha) = 801404,825 \text{ kN} \quad (4)$$

Persentase kehilangan gaya prategang FR:

$$FR = \frac{Ps - P_o}{P_o} \times 100\% = 5,199\%.$$

c. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Slip pada Angkur (ANC)

Ditentukan menggunakan persamaan:

$$ANC = \Delta L = \frac{f_c}{E_s} \times L = 562,43 \text{ mm} \quad (5)$$

Persentase kehilangan gaya prategang ANC:

$$\%ANC = \frac{\Delta L}{L} = 0,446\%$$

d. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Rangkak (CR)

Kehilangan gaya prategang ini terjadi dalam jangka waktu tertentu. Ditentukan menggunakan persamaan:

$$CR = K_{CR} \frac{E_S}{E_C} (f_{ci} - f_{cd}) \quad (6)$$

dengan tegangan inisial:

$$f_{ci} = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_{MS} \times e_s}{I_o} = 1,66 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{M_{MS} \times e_s}{I_o} = 0,5 \text{ MPa}$$

Diperoleh nilai $CR = 141,68 \text{ MPa}$

Persentase kehilangan gaya akibat CR:

$$\%CR = \frac{CR}{f_c} \times 100 = 7,6\%$$

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

Ditentukan menggunakan persamaan

$$SH = \epsilon_{CS} \times Es = 41,92 \text{ MPa}$$

Persentase kehilangan gaya prategang SH:

$$\%SH = \frac{SH}{f_c} \times 100 = 2,26\%$$

f. Kehilangan Gaya Prategang Akibat Relaksasi Baja (RE)

Ditentukan menggunakan persamaan

$$RE = C (K_{RE} - J (SH + CR + ES)) = 118,55 \text{ MPa}$$

Persentase kehilangan gaya prategang RE:

$$\%RE = \frac{RE}{f_c} \times 100 = 6,38\%$$

Batas izin kehilangan gaya prategang adalah 25% (Nawy, 2001). Total kehilangan gaya prategang diperoleh 22,465%, lebih kecil dari batas ijin 25%. Nilai kehilangan gaya prategang memenuhi persyaratan.

PERENCANAAN ULANG STRUKTUR ATAS JEMBATAN KALIKETHEK

MENGGUNAKAN *SINGLE CELL BOX GIRDER* BETON PRATEGANG

(Zahra El Himmah & Utari Khatulistiadi)

4.9 Tegangan Akibat Gaya Prategang

Eksentrisitas, $e_s = 1,594 \text{ m}$

Momen maksimum beban sendiri, $M_{bs} = 90165,9 \text{ kNm}$.

Tegangan pada keadaan awal:

Serat atas

$$f_t = -\frac{f_o}{A_c} + \frac{f_o \times e_s}{s_t} - \frac{M_{bs}}{s_t} = -33,59 \text{ MPa} < f_{ti} = 4,157 \text{ MPa} \text{ (OK)}$$

Serat bawah

$$f_b = -\frac{f_o}{A_c} + \frac{f_o \times e_s}{s_b} - \frac{M_{bs}}{s_b} = -48,8 \text{ MPa} < f_{ci} = 28,8 \text{ MPa} \text{ (OK)}$$

Tegangan pada keadaan akhir

Tegangan efektif, $P_{eff} = 76928,5 \text{ kN}$

Serat atas

$$f_t = -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e_s}{s_t} - \frac{M_{bs}}{s_t} = -22,76 \text{ MPa} < f_c = 30 \text{ MPa} \text{ (OK)}$$

Serat bawah

$$f_b = -\frac{P_{eff}}{A_c} + \frac{P_{eff} \times e_s}{s_b} - \frac{M_{bs}}{s_b} = -35,31 \text{ MPa} < f_t = 3,88 \text{ MPa} \text{ (OK)}$$

4.10 Kontrol Lendutan

Analisis lendutan diperlukan beberapa data sebagai berikut:

Titik eksentrisitas, $e_s = 1,594 \text{ m}$

Momen inersia balok, $I_x = 3,899 \text{ m}^4$

Gaya prategang awal, $F_o = 109895 \text{ kN}$

Modulus elastisitas beton, $E_c = 36406,44 \text{ MPa}$

Lendutan pada keadaan awal

Lendutan ke atas (*camber*)

$$\delta_c = \frac{5}{48} \times \frac{F_o \times e_s \times L^2}{E_c \times I_x} \quad (7)$$

Diperoleh $\delta_c = -0,4619 \text{ m} (\uparrow)$

Lendutan ke bawah (*deflection*)

$$\delta_D = \frac{5}{384} \times \frac{Q_{bs} \times L^4}{E_c \times I_x} \quad (8)$$

Diperoleh $\delta_D = 0,2378 \text{ m} (\downarrow)$

Total lendutan, δ_{total} :

$$\delta_{total} = \delta_c + \delta_D = -0,4619 + 0,2378 = -0,2241 \text{ m} (\uparrow)$$

Lendutan pada keadaan akhir

Lendutan ke atas (*camber*)

$$\delta_c = \frac{5}{48} \times \frac{F_{eff} \times e_s \times L^2}{E_c \times I_x} = -0,323 \text{ m} (\uparrow)$$

Lendutan ke bawah (*deflection*)

Ditentukan menggunakan persamaan (8), dan diuraikan pada **Tabel 4** menguraikan lendutan ke bawah (*deflection*) yang terjadi searah gravitasi bumi akibat berat sendiri, beban mati, dan lajur D diuraikan pada **Tabel 4**. Diperoleh total lendutan ke bawah (*deflection*), $\delta_D = 0,3298 \text{ m}$.

Setelah diperhitungkan terhadap camber diperoleh total lendutan, δ_{total} :

$$\begin{aligned} \delta_{total} &= \delta_c + \delta_D \\ &= -0,323 + 0,3298 = -0,0068 \text{ m} (\uparrow) \end{aligned}$$

Tabel 4. Lendutan yang Terjadi

Jenis Beban	Nilai Lendutan ke Bawah (m)
Berat sendiri	0,2378
Beban mati	0,0234
Lajur D	0,0686
Total	0,3298

(Sumber: Hasil analisis data penulis)

Perhitungan *End Block*

Digunakan angkur tegangan VSL tipe E5 – 38

Jumlah *strands* dalam 1 tendon = 38

Beban putus 1 *strands*, $P_{bs} = 187,32 \text{ kN}$

Beban putus 1 tendon, $P_{bs} = 187,32 \times 77,9\% = 5107,5 \text{ kN}$

Lebar angkur, $a = 325 \text{ m}$

Luas tulangan yang dibutuhkan

$$A_{S1} = \frac{T}{0,6 \times f_y} = 4747,4 \text{ m}$$

Diameter tulangan, $D = 16 \text{ mm}$

Luas tulangan:

$$A_{S2} = \frac{1}{4} \times \pi \times D^2 \times 2 = 402,13 \text{ mm}^2$$

Tulangan yang dipakai: $\frac{A_{S1}}{A_{S2}} = 11,806 \approx 12$

Maka digunakan tulangan angkur 12D16

4.11 Penulangan *Box Girder*

Direncanakan tulangan lentur Ø20 dan sengkang Ø19 dengan mutu beton $f'c = 60 \text{ MPa}$, maka $\beta = 0,65$ (SNI 2847:2019 tabel 22.2.2.4.3) dan mutu baja, $f_y = 420 \text{ MPa}$

Penulangan Lentur Balok Prategang

Momen nominal $M_n = 1126,46 \text{ kNm}$; $\rho = 0,003$

Didapatkan $A_s = 4371,42 \text{ mm}^2$

Dipakai tulangan D20 dengan luas penampang $A = 4488,8 \text{ mm}^2$

Tulangan lentur D20 – 70 mm.

Penulangan Geser Balok Prategang

Momen nominal *box girder*, $M_n = 112707,40 \text{ kNm}$.

Komponen vertikal dari gaya prategang, $V_p = 17405,67 \text{ kNm}$

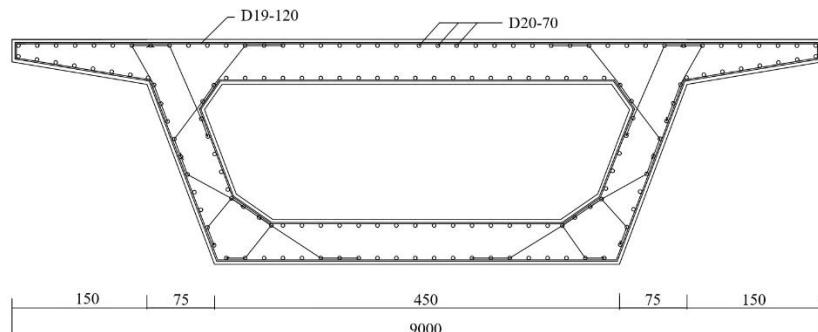
Retak akibat geser pada penampang, $V_{cw} = 28844,08 \text{ kN}$

Retak miring akibat lentur, $V_{ci} = 2734 \text{ kN}$, $V_s = 7775,142 \text{ kN}$

Jarak sengkang, $s = 2246,27 \text{ mm}$

Dipakai tulangan sengkang D19 – 120 mm ($A_s = 2362,7 \text{ mm}^2$) seperti ditampilkan pada **Gambar 8**.

Tulangan yang direncanakan untuk dapat menahan gaya yang terjadi selama proses perkuatan dan gaya akibat beban terhadap *girder*.



Gambar 8. Penulangan Box Girder

(Sumber: Penulis)

5. KESIMPULAN

Kesimpulan dari perencanaan struktur atas Jembatan Kalikethok bentang 54,94 meter dan lebar 9 meter menggunakan *single cell box girder* dengan dimensi *box girder* jembatan diperoleh tinggi 2,5 m, dan lebar di bagian atas 9 m, lebar di bagian bawah 4,5 m dengan tebal *slab* 50 cm. Penulangan lentur *box girder* adalah D20-70mm. Tendon yang digunakan sejumlah 24 buah menggunakan *strands* jenis *uncoated wire 7 super strands* ASTM A-416 grade 270.

Kehilangan gaya prategang sudah memenuhi syarat. Total kehilangan gaya prategang akibat perpendekan elastis, susut, rangkak, slip akibat angkur, gaya gesekan dan relaksasi baja diperoleh 22,46% lebih kecil dari syarat gaya prategang maksimum adalah 25%. Tegangan yang terjadi pada kondisi akhir yaitu di serat atas sebesar -22,76 dan pada serat bawah sebesar -35,31 MPa, nilai tersebut lebih kecil dari tegangan ijin. Lendutan yang terjadi pada perencanaan ditinjau pada keadaan awal dan keadaan akhir dengan jumlah total lendutan sebesar 6,8 mm (lendutan ke bawah), lebih kecil dari batas lendutan ijin sebesar 229 mm.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Apriyanto, D., & Siswoyo, S. (2021). Perencanaan Girder Jembatan Beton Prategang Jl. Raya Sememi Benowo Surabaya Section 0 - 152. *Axial: Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Konstruksi*, 9(1), 035. <https://doi.org/10.30742/axial.v9i1.1700>
- Krishna Raju. (2020). Beton Prategang. In *Penerbit Erlangga* (Issue 11).
- Lin, T. Y., & Burns, N. H. (2000). Desain Struktur Beton Prategang. In *Lin, T. Y.*

- Burns, Ned H.*
 Midaada, A. (2022). *Jembatan Kaliketek, Saksi Perjuangan Pejuang Bojonegoro Melawan Belanda*. Okezone. https://nasional.okezone.com/read/2022/05/26/337/2594692/jembatan-kaliketek-saksi-perjuangan-pejuang-bojonegoro-melawan-belanda?page=all#google_vignette
- Nawy, E. G. (2001). Beton Prategang. In *Penerbit Erlangga*.
- Sugeng, K. (2023). *9 Fakta tentang Bojonegoro yang Mendapat Julukan Kota Minyak*. IDN Times. <https://www.idntimes.com/travel/destination/9-fakta-tentang-bojonegoro-yang-mendapat-julukan-kota-minyak-01-mr4bd-h4lfvr>
- Supriyadi, B., & Muntohar, A. S. (2007). *Jembatan* (Edisi Pertama). In *Jembatan*.