Analisis Perbandingan Kehilangan Prategang Akibat Variasi Letak *Tendon* PC I Girder Jembatan Beton Prategang

Ibham Yamin¹, Siswanti Zuraida¹, Ilham¹

¹. Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Sains Bandung, Cikarang, Indonesia
ibhamyamin@gmail.com

Informasi naskah:

Diterima
15 Juli 2020
Direvisi
17 Agustus 2020
Disetujui terbit
20 Agustus 2020
Diterbitkan
31 Agustus 2020

Abstract

Prestressed force loss always occurs in prestressed concrete (loss prestressed). The most common form used in pre-tensile beams is straight tendons and for post-tensile beams are curved tendons. In planning a prestressed concrete bridge structure, the loss of prestressed force must be considered, because the stress on the prestressed concrete tendon decreases continuously over time. The number of factors that are interrelated, for the effectiveness of the design, location of tendons along the spans need to be considered, so that the tensile strength that occurs in the extreme fiber beam is limited or none at all in the cross section. This final project will examine the shape of the PC beam I Girder with 4 tendon setting conditions namely straight tendon cable which is on the neutral axis so that the eccentricity = 0 (condition1), straight tendon cable which is at $1/6 h$ so that the eccentricity $\neq 0$ (condition 2), tendon cable with draped / parabolic shape (condition 3), and tendon condition with harped shape (condition 4). The biggest prestressed loss results were PC I Girder (condition 2) = 395.81 MPa (26.07%), while the smallest prestressed loss is PC I Girder (condition3) = 367.44 MPa (24.2%). Condition 1 and 2 in girder is not suitable for use because it exceeds the value of the allowable stress at the limit of prestressed and deflection permits on girder are safe for each condition.

Keywords: *loss of prestressed, tendon variation, tension control, deflection control*

1. PENDAHULUAN

Jembatan beton prategang merupakan fasilitas penghubung berpindahnya manusia dari tempat asal ke tempat tujuan dimana di antara kedua tempat tersebut terdapat rintangan yang menggunakan beton prategang pada strukturnya ¹⁾. Bangunan struktural pada jembatan beton prategang terdiri dari tiang pancang, pile cap, kolom, pier head, *Girder* dan slab lantai kerja ²⁾. Kemampuan sebuah jembatan beton prategang sangat dipengaruhi oleh

kekuatan *Girdernya* yang menurut sistem perancangannya *Girder* terdiri dari dua jenis *Girder* precast dan on site *Girder* ³⁾. *Girder* memiliki banyak bentuk di antaranya PC I *Girder*, PC U *Girder*, box *Girder* dan voided slab dimana setiap bentuk memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing ⁴⁾.

Penelitian ini menggunakan *Precast Concrete I Girder*. Beton prategang adalah beton yang mengalami tegangan internal dengan besar (akibat *stressing*) dan distribusi sedemikian rupa sehingga dapat mengimbangi sampai batas tertentu tegangan yang terjadi akibat beban eksternal ⁵⁾. Pekerjaan penting dilakukan pada *Girder* adalah proses *stressing* yang merupakan proses penarikan kabel *tendon* yang ada di dalam *Girder* untuk menjadikan *Girder* sebagai beton prategang. Pemberian tegangan pada *stressing* dapat dilakukan dengan dua sistem, sistem pratarik (*pre-tension*) dan pasca tarik (*post-tension*) ⁶⁾. *Tendon* lurus banyak digunakan pada balok pracetak, sedangkan penggunaan *tendon* lengkung lebih umum digunakan pada elemen pascatarik ⁷⁾. Pemberian tegangan pada beton prategang mengakibatkan kehilangan gaya prategang (*loss prestressed*) ⁸⁾. Dalam perencanaan struktur jembatan beton prategang kehilangan gaya prategang harus dipertimbangkan, karena tegangan pada *tendon* beton prategang berkurang secara kontinu seiring berjalannya waktu ⁹⁾. Kehilangan gaya prategang dalam *tendon* untuk setiap waktu harus diambil sebagai jumlah dari kehilangan seketika dan kehilangan yang tergantung waktu, baik dalam jangka pendek maupun jangka Panjang ¹⁰⁾. Kehilangan gaya prategang adalah berkurangnya gaya yang bekerja pada *tendon* pada tahap-tahap pembebanan. Secara umum kehilangan gaya prategang dapat dijelaskan sebagai berikut ¹¹⁾:

1. *Immediate Elastic Losses*, yaitu kehilangan gaya prategang langsung atau segera setelah beton diberi gaya prategang. Kehilangan gaya prategang secara langsung ini disebabkan oleh perpendekan elastis beton, kehilangan akibat friksi atau geseran sepanjang kelengkungan dari *tendon*, ini terjadi pada beton prategang dengan sistem post tension, dan kehilangan pada sistem ankkur, antara lain akibat slip di ankkur.
2. *Time Dependent Losses*, yaitu kehilangan gaya prategang akibat dari pengaruh waktu, yang mana hal ini disebabkan oleh rangkak (*creep*), susut pada beton, dan pengaruh temperature dan relaksasi baja/kabel prategang.

Keefektifan desain letak *tendon* di sepanjang bentang perlu diperhatikan karena banyaknya faktor yang saling terkait, sebagai contoh tegangan tarik yang terjadi di serat ekstrim balok sangat terbatasnya atau tidak ada sama sekali di penampang. Total kehilangan gaya prategang harus relatif lebih kecil dibandingkan gaya prategang yang bekerja sehingga perlu dilakukan analisis mengenai kehilangan gaya prategang yang terjadi. Oleh sebab itu penelitian ini menganalisis perbandingan kehilangan prategang akibat variasi letak *tendon* PC I *Girder* jembatan beton prategang.

2. METODE

2.1 Data Perencanaan

Gambar 1. Bentang balok prategang

Tabel 1. Data prategang

Keterangan	Notasi	Dimensi (mm)
Panjang total	L	30000
Jarak antar <i>girder</i> I	S	2000
Jarak antar <i>girder</i> U	S	3000
Bentang slab Box	S	4000
Tebal slab lantai	Ho	220
Tebal aspal	Ha	50

Gambar 2. PC I *girder*

Tabel 2. Dimensi PC I *girder*

Kode	Dimensi (mm)	Kode	Dimensi (mm)
H	1700	tfl-1	200
A	800	tfl-2	120
B	700	tfl-3	250
Tweb	200	tfl-4	250

Untuk jembatan prategang pada *girder* menggunakan mutu beton K-500. Dari analisis mutu balok prategang didapatkan hasil sebagai berikut:

Kuat tekan beton prategang (f_c') = 41.5 Mpa
 Kuat Tekan beton pada keadaan awal (f_{ci}') = 80 % f_c'
 = 33.2 Mpa
 Modulus elastic beton (E_c) = $4700\sqrt{f_{ci}'}$
 = 30277.6 Mpa

2.2 Model Variasi Tendon

Berikut kondisi – kondisi letak *tendon*:

1. Kabel *tendon* lurus ditempatkan berada pada sumbu netral sehingga eksentrisitas = 0.
2. Kabel *tendon* lurus ditempatkan berada pada $1/6 h$ sehingga eksentrisitas $\neq 0$.
3. Kabel *tendon* memiliki lintasan berbentuk *draped* (parabola).
4. Kondisi *tendon* memiliki lintasan berbentuk *harped*.

2.3 Prosedur penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian yang akan dilakukan sebagai berikut:

1. Menentukan data struktur jembatan dan profil *girder*.
2. Menghitung analisis penampang *girder*.
3. Menghitung pembebanan pada jembatan.
4. Menghitung kehilangan prategang akibat variasi *tendon*.
5. Menghitung kontrol tegangan dan lendutan
6. Menyimpulkan bagaimana perbandingan kehilangan prategang akibat variasi *tendon*.

3. PEMBAHASAN DAN DISKUSI

3.1 Analisis Penampang

Analisis penampang dibutuhkan untuk mengetahui luas, titik berat, momen inersia dan *modulus section* pada balok, baik balok *precast* maupun balok komposit ¹²⁾. Analisis penampang pada PC I *girder* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Analisis penampang

Ket	PC I Gider	
	Balok Precast	Komposit
A (m ²)	0.6695	0.9325
Yb (m)	0.8166	1.094
Ya (m)	0.8834	0.806
I (m ⁴)	0.2364	0.4199
Wa (m ³)	0.2676	0.5209
Wb (m ³)	0.2895	0.3838

3.2 Pembebanan pada Jembatan

Balok *girder* merupakan komponen struktur yang menerima beban kombinasi, baik beban mati, beban hidup, gaya rem, beban angin dan beban gempa ¹³⁾. Kombinasi pembebanan pada PC I *girder* dapat dilihat Tabel 4.

Tabel 4 Pembebanan pada jembatan

Jenis Beban	Kode	PC I Gider	
		Komb1	Komb2
Beban sendiri	MS	3647.17	3647.17
Beban mati tamb	MA	357.75	357.75
Beban lajur	TD	3054	3054

Gaya rem	TB	35.70	35.70
Beban angin	EW	330.75	-
Beban gempa	EQ	-	574
Jumlah (kNm)	MU	7425.37	7668.62

3.3 Gaya Prategang

Jenis kabel yang digunakan adalah *uncoated 7 wire super strands*, ASTM A-416 ¹⁴⁾ grade 270 dengan spesifikasi diameter standar 1,27 cm, modulus elastisitas 193000 Mpa dan *effective section area* (A_{st}) 0,987 cm². Gaya prategang pada PC I girder dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5 Gaya prategang

Keterangan (PC I Girder)	Kode	Kond1	Kond2	Kond3	Kond4
Jenis <i>tendon</i>	-	Lurus	Lurus	<i>Draped</i>	<i>Harped</i>
Titik berat <i>tendon</i> (m)	Zo	0.8166	0.28	0.135	0.125
Eksentrisitas <i>tendon</i> (m)	Es	0	0.5333	0.6816	0.6916
Gaya prategang awal(kN)	Pt	4441.52	7960.83	6813.82	6580.37
Teg. pada penampang (MPa)	Fcir	6.634	11.89	10.17	9.82
Teg. pada pusat berat (MPa)	Fcds	1.236	1.205	1.541	1.563
Jumlah <i>strand</i> yang dibutuhkan	ns	30	52	44	44
G.prategang akibat jacking(kN)	Pj	4622.01	8284.35	7090.73	6847.79

Kehilangan prategang membutuhkan data-data sebagai berikut.

Momen akibat berat sendiri balok (Mbs)

Mbs PC I = 1920.628 kNm;

Jumlah *tendon* yang direncanakan (nt)

nt PC I = 4;

Koefisien kelengkungan (μ) dan sudut (α);

μ kond 1 = 0; kond 2 = 0; kond 3 = 0.2; kond 4 = 0.25.

α kond 1 = 0; kond 2 = 0; kond 3 = 0.1; kond 4 = 0.1.

Koefisien rangkai pasca tarik (K_{cr}) = 1.6 untuk pascatarik ¹⁹⁾.

Nilai faktor relaksasi C = 0.75;

Nilai koefisien relaksasi (K_{RE}) = 138 MPa;

Nilai faktor waktu (J) = 0.15.

Panjang slip (Δa) = 3 mm

Untuk *tendon* type 7 wire *strand* pada selongsong yang fleksibel, harga koefisien wobble $K = 0,0016 \sim 0.0066$ ¹⁸⁾. koefisien wobble K;

w kond 1 = 0.004; kond 2 = 0.002;

kond 3 = 0.002; kond 4 = 0.002.

3.4 Kehilangan Prategang

Kehilangan prategang dapat berupa proses menurunnya tegangan prategang dapat diakibatkan oleh mutu beton dan letak *tendon*nya. Berikut grafik yang dihasilkan setiap kondisi pada *girder*.

Gambar 3 Grafik kehilangan prategang

Perbandingan pada jenis kehilangan perpendekan elastis (ES) terbesar terjadi pada kondisi 2 (PC I = 37.89 MPa) dikarenakan nilai tegangan pada penampang beton yang besar. Hal ini berpengaruh terhadap nilai rangkak pada beton (CR) yang besar juga terjadi pada kondisi 2 (PC I = 108.98 MPa) karena deformasi adanya tegangan pada penampang beton sebagai fungsi dari waktu ²⁰⁾. Perbandingan susut pada beton (SH) memiliki nilai yang sama pada setiap kondisi Sebesar 26.132 MPa dikarenakan kuat tekan beton yang digunakan sama sehingga menghasilkan modulus elastisitas beton yang sama, lalu *tendon* baja mengalami perpanjangan tergantung pada lamanya waktu berjalan dan nilai tegangan yang ada serta dihambat juga oleh besaran perpendekan elastis (ES) sehingga diperoleh nilai Relaksasi kabel baja (RE) yang terbesar pada kondisi 1 (PC I = 91.98 MPa). Gesekan *tendon* (FR) terbesar terjadi pada kondisi 1 (PC I = 182 MPa) terjadi karena pengaruh pergerakan dari selongsong yang di letakkan secara konsentris maka timbul koefisien yang besar ¹⁵⁾ dan nilai slip ankur (ANC) memiliki nilai yang sama pada setiap kondisi pada *girder* sebesar 19.3 MPa dikarenakan jenis *strand* (Uncoated stress relieve seven wires *strand* ASTM A416 Grade 270 Low Relaxation) dan nilai elastisitas beton yang digunakan sama. Berikut grafik total kehilangan prategang PCI *girder*.

Gambar 4 Grafik total kehilangan

Gaya prategangan akan mengalami kehilangan prategangan sehingga gaya pratekan yang diperlukan untuk desain menggunakan tegangan pratekan efektif, yakni nilai tegangan prategang yang sudah memperhitungkan besarnya kehilangan prategangan ¹⁶⁾. Hasil total kehilangan prategang terbesar adalah PC I girder (kondisi2) = 395.81 MPa (26.07%), sedangkan kehilangan prategang terkecil adalah PC I girder (kondisi3) = 367.44 MPa (24.2%).

3.5 Kontrol Tegangan dan Lendutan

Kontrol tegangan izin dan lendutan pada masing-masing girder dapat dilihat pada Tabel 6 dan Tabel 7.

Tabel. 6 Kontrol Tegangan Ijin

Kontrol tegangan		PC I Girder				Tegangan izin (MPa)
		Kondisi 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4	
Sesaat setelah penegangan	Atas	-13.06	-3.44	-0.56	-0.59	2.88
	Bawah	0.74	-18.3	-17.53	-16.8	19.92
Pada saat layan	Atas	-16.17	-7.93	-5.44	-5.45	18.86
	Bawah	14.87	-0.96	-0.57	0.005	3.22

Kondisi 1 dan 2 melampaui tegangan izin pada serat atas 13.06 dan 3.44 > 2.88 MPa yang diizinkan pada saat transfer. Kondisi 1 pada saat semua beban diperhitungkan 14.87 > 3.22 MPa, sehingga kondisi 1 dan 2 tidak cocok digunakan untuk perencanaan jembatan beton prategang pascatarik I girder. Tegangan kerja dari suatu komponen struktur jembatan pada grafik yang melampaui nilai tegangan yang diijinkan sehingga berpotensi mengakibatkan keretakan pada komponen beton dan tegangan yang berlebihan pada serat-serat atas dari gelagar sehingga mengakibatkan keruntuhannya ¹⁷⁾. Kondisi 3 dan 4 bisa digunakan meski kondisi 2 mempunyai nilai kehilangan prategang yang lebih kecil dari semua kondisi di PC I girder. Pada RSNI T-12-2004 Perencanaan struktur beton untuk jembatan, lendutan akibat beban rencana untuk daya layan pada Peraturan Pembebanan

untuk Jembatan Jalan Raya tidak melampaui 1/250 bentang. Berikut hasil seluruh lendutan yang terjadi pada *girder*.

Tabel 7 Kontrol Lendutan

Kontrol lendutan	<i>PC I Girder</i>				Lendutan izin (mm)
	Kond 1	Kondisi 2	Kondisi 3	Kondisi 4	
Kondisi awal	-47.76	10.09	15.53	14.25	120
Kondisi akhir	-51.46	-26.77	-24.61	-25.22	120
Keterangan	OK	OK	OK	OK	----

Hasil kontrol lendutan menunjukkan seluruh kondisi pada setiap *girder* aman tidak melampaui 1/250 bentang yaitu 120 mm. Lendutan terkecil beton pada kondisi beban layan (setelah memperhitungkan semua kehilangan tegangan) PC I *girder* = kondisi 3 (-24.61mm) lendutan terbesar pada *girder* dihasilkan oleh kondisi 1.

4. KESIMPULAN

Variasi *tendon* pada beton prategang pasca tarik berpengaruh pada kehilangan prategang khususnya pada kehilangan prategang akibat gesekan pada *tendon*. Variasi *tendon* yang ada; kondisi 3 (*Draped*) menghasilkan kehilangan prategang lebih kecil pada *girder*. Kehilangan prategang terbesar terjadi pada kondisi 1 (Lurus $e = 0$)

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada:

- 1) Ibu Siswanti Zuraída., MT. selaku Dosen Pembimbing I Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi dan Sains Bandung.
- 2) Bapak Ilham., MT. selaku Dosen Pembimbing II Tugas Akhir Program Studi Teknik Sipil Institut Teknologi dan Sains Bandung.

6. DAFTAR PUSTAKA

- 1) H.J Struyk, K.H.C.W Van Der Hen, dan Soemargono. (1990). Jembatan. Penerbit: Pradnya Paramita. Jakarta.
- 2) Raju, N. Krishna. (1988). Beton Prategang Edisi Kedua. Penerbit : Erlangga. Jakarta. 477 hlm.
- 3) Budiadi, Andri. (2008). Desain Praktis Beton Prategang. Penerbit: Penerbit Andi. Yogyakarta. 498 hlm.
- 4) SNI 1725:2016. (2016). Pembebanan untuk Jembatan. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- 5) Lin, T.Y. dan Burns, Ned. H. (2000). Desain Struktur Beton Prategang Edisi Ketiga. Penerbit : Binarupa Aksara. Jakarta. 411 hlm.
- 6) SNI 2847:2013. (2013). Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- 7) Nawy, Edward. G. (2001). Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar Edisi Ketiga. Penerbit : Erlangga. Jakarta. 452 hlm.

- 8) Pricilia. (2016). Analisa Prestress Metode Post Tension Pada Balok Proyek Supermall Pakuwon Indah Phase-3 Surabaya (Skripsi). Surabaya: Universitas Narotama Surabaya.
- 9) Prestressed Concrete Institute. (2004). PCI Design Handbook 6th Edition. Prestressed Concrete Institute, Chicago.
- 10) RSNI T-12-2004. (2004). Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- 11) Soetoyo. (2015). Konstruksi Beton Pratekan. Penerbit : Gunadharma. Jakarta.
- 12) Indra. (2015). Studi Perencanaan Jembatan Kali Surabaya Pada Akses Tol Sumo Dengan Balok Beton Pratekan Tipe I Girder. Jurnal Rekayasa Sipil, 3(2), 70-84.
- 13) Armin H.Manalip dan Banu D. Handono. (2018). Perencanaan Balok Girder Profil I pada Jembatan Prestressed dengan Variasi Bentang. Jurnal Sipil Statik, 6(2), 67-74.
- 14) ASTM A 416., Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire for Prestressed Concrete
- 15) Yunalia dan Bastya. (2017). Studi Perbandingan Penggunaan Pcu Girder Dan Pci Girder Pada Struktur Atas Jembatan Jurang Gempal, Wonogiri (Skripsi). Yogyakarta: Universitas Islam Indonesia
- 16) Priyono. (2018). Pengaruh Beban Gempa pada Struktur Atas Jembatan Jalan Raya dengan I-Girder Beton Prategang Apabila Terjadi Ketidakpastian Prediksi Kehilangan Prategang. Jurnal Rekayasa Sipil dan Lingkungan, 2(2), 131-140.
- 17) Dini Fitria Annur dan Johannes Tarigan. (2013). Perencanaan Precast Concrete I Girder pada Jembatan Prestressed Post-tension dengan Bantuan Program Microsoft Office Excel (Skripsi). Medan: Universitas Sumatera Utara.
- 18) Christopher dan Theresa. (2004). A Probabilistic Comparison of Prestress Loss Methods in Prestressed Concrete Beams. PCI Journal, 49 (5), 52-69.
- 19) Ilham Noer, (2008). Perhitungan Balok Prategang (Pci - Girder) - Jembatan Srandakan Kulon Progo D.I. Yogyakarta. Penerbit: MNI-EC. Yogyakarta.
- 20) Rizkia, R. Selvia. (2017). Analisis Perbandingan Kehilangan Prategang Akibat Metode Stressing Satu Arah Dan Dua Arah Pada Jembatan Beton Prategang (Skripsi). Bandar Lampung: Universitas Lampung.