

Analisa Desain *PC I Girder* Pada *Section Overpass* STA 52+174 Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda

Willy Susanto¹⁾, Sujiati Jepriani²⁾, Joko Suryono³⁾

E-Mail : willy.susanto056@gmail.com¹⁾; sujiati_jepriani@polnes.ac.id²⁾; jokosuryono55@gmail.com³⁾;

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Samarinda

Jl. Cipto Mangunkusumo Kampus Gunung Panjang, Kota Samarinda 75131,
Kalimantan Timur, Indonesia

Koresponden naskah : sujiati_jepriani@polnes.ac.id

SUBMITTED Sept 2, 2020 | REVISED Dec 4, 2020 | ACCEPTED Feb 25, 2021 (Editor)

ABSTRACT

A bridge is a structure that functions to connect two parts of a road divide by obstacles. Balikpapan - Samarinda Toll Road Project applied a bridge with a prestressed concrete system. A prestressed concrete system is applied to the superstructure. Girder is part of the superstructure that functions to distribute the load to the lower structure then forwarded to the foundation. There are many types of prestressed concrete girders including PC I Girder, PC U Girder, Box Girder, and Voided Slab where each form has its advantages and disadvantages. The purpose of this study was to analyze the PC I girder design used on the bridge in Section Overpass STA 52 + 174 of the Balikpapan-Samarinda Toll Road Project. The object of this research is a PC I girder with a span length of 25.80 m and 16.80 m. From the analysis, it is known that the stress that occurs due to the combination of loading is safe with the behavior of the prestressed concrete section categorized as class U with the assumption that the behavior of the prestressed section is intact or not cracked. However, in several load combinations, it is known the behavior of prestressed concrete is categorized as class C ($f > 1.0\sqrt{f_c}$) with the assumption that the behavior of the fractured prestressed section and class T ($0.62\sqrt{f_c} < f < 1.0\sqrt{f_c}$) assuming the intermediate stress section behavior between intact and cracked. If the prestressed is categorized as class C and class T, then non-prestressed reinforcement is needed in the flexural area where the crack occurs to accommodate the tensile stress.

Keywords – prestressed concrete, PC I girder, concrete stress

ABSTRAK

Jembatan adalah suatu struktur yang berfungsi menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan seperti lembah, sungai, laut, jurang, drainase, jalan, dan sebagainya. Proyek Jalan Tol Balikpapan - Samarinda mengaplikasikan jembatan dengan sistem beton prategang. Sistem beton prategang diaplikasikan di struktur atas yaitu pada gelagar atau girder. Girder adalah bagian dari struktur atas yang berfungsi menyalurkan beban yang diterimanya menuju struktur bawah untuk selanjutnya diteruskan ke pondasi. Bentuk girder beton prategang memiliki banyak jenis diantaranya *PC I Girder*, *PC U Girder*, *Box Girder* dan *Voided Slab* dimana setiap bentuk memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Tujuan penelitian ini dilakukan untuk menganalisa desain *PC I girder* yang digunakan pada jembatan di *Section Overpass* STA 52+174 Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda. Objek penelitian ini adalah *PC I girder* dengan panjang *span* 25,80 m dan 16,80 m. Dari hasil analisis diketahui tegangan yang terjadi akibat kombinasi pembebanan adalah aman dengan perilaku penampang beton prategang dikategorikan sebagai kelas *U* dengan asumsi perilaku penampang prategang utuh atau tidak retak. Namun dibebberapa kombinasi pembebanan diketahui terdapat perilaku penampang beton prategang yang dikategorikan sebagai kelas *C* ($f > 1,0\sqrt{f_c}$) dengan asumsi perilaku penampang prategang retak dan kelas *T* ($0,62\sqrt{f_c} < f < 1,0\sqrt{f_c}$) dengan asumsi perilaku penampang prategang peralihan antara utuh dan retak. Bila penampang prategang merupakan kelas *C* dan kelas *T*, maka dibutuhkan tulangan tarik non prategang pada daerah lentur terjadinya retak untuk mengakomodir tegangan tarik yang terjadi.

Kata Kunci – beton prategang, PC I girder, tegangan beton

1. PENDAHULUAN

Jembatan adalah suatu struktur yang berfungsi menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan seperti lembah, sungai,

laut, jurang, drainase, jalan, dan sebagainya. Proyek Jalan Tol Balikpapan - Samarinda mengaplikasikan jembatan dengan sistem beton prategang.

Sistem beton prategang diaplikasikan di struktur atas yaitu pada gelagar atau girder. Girder adalah bagian dari struktur atas yang berfungsi menyalurkan beban yang diterimanya menuju struktur bawah untuk selanjutnya diteruskan ke pondasi. Bentuk girder beton prategang memiliki banyak jenis diantaranya *PC I Girder*, *PC U Girder*, *Box Girder* dan *Voided Slab* dimana setiap bentuk memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing.

Tujuan penelitian ini dilakukan untuk menganalisa desain *PC I girder* yang digunakan pada jembatan di *Section Overpass STA 52+174* Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda. Objek penelitian ini adalah *PC I girder* dengan panjang *span* 25,80 m dan 16,80 m.

2. TINJAUAN PUSAKA

A. Definisi Jembatan

Jembatan adalah suatu bangunan struktural yang digunakan untuk melewati orang atau kendaraan di atas dua daerah/kawasan atau ruang yang terpisah oleh sungai, lembah, jurang, jalan atau hambatan fisik lainnya. Jembatan mempunyai fungsi sebagai penghubung dua daerah yang terpisah untuk melancarkan dan memudahkan kegiatan manusia (BSN, 2008).

B. Pembebanan Jembatan

Perhitungan pembebanan yang bekerja mengacu pada SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan. Berdasarkan SNI 1725:2016, beban-beban yang mempengaruhi struktur pada penelitian ini terdiri dari berat sendiri (*MS*), beban mati tambahan/utilitas (*MA*), beban lajur “D” (*TD*), gaya rem (*TB*), beban angin pada struktur (*EW_S*), beban angin pada kendaraan (*EW_L*), beban gempa (*EQ*), pengaruh suhu (*EU_n*), variasi temperatur (*TG*), dan gesekan pada perletakan (*BF*). Untuk kombinasi pembebanan setiap faktor beban harus dipilih sedemikian rupa untuk menghasilkan kondisi ekstrem akibat beban yang bekerja. Untuk setiap kombinasi pembebanan harus diselidiki kondisi ekstrem maksimum dan minimum.

Tabel 1. Faktor Modifikasi λ

Beton	Komposisi Agregat	λ
Beton ringan dengan semua agregat ringan	Halus: ASTM C330M Kasar: ASTM C330M	0,75
Beton ringan, agregat halus campuran	Halus: Kombinasi ASTM C330M dan C33M Kasar: ASTM C330M	0,75 s/d 0,85
Beton ringan dengan pasir ringan	Halus: ASTM C33M Kasar: ASTM C330M	0,85
Beton ringan dengan pasir ringan, dan agregat kasar campuran	Halus: ASTM C33M Kasar: Kombinasi ASTM C330M dan C33M	0,85 s/d 1,00
Beton normal	Halus: ASTM C33M Kasar: ASTM C33M	1,00

Sumber: SNI 2847:2019

Baja prategang adalah baja mutu tinggi seperti strands, kawat, batang prategang yang memenuhi syarat ASTM A416M, ASTM A421M dan ASTM A722M. Kuat tarik baja prategang f_{pu} harus

C. Definisi Beton Prategang

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. Sistem beton prategang (*prestressed concrete*) diaplikasikan pada girder. Girder adalah bagian dari struktur atas yang berfungsi menyalurkan beban yang diterimanya menuju struktur bawah untuk selanjutnya diteruskan ke pondasi. Perkiraan dimensi tinggi girder menggunakan pendekatan awal sebagai berikut (Lin, dkk, 2000):

$$\text{Tinggi balok, } h = \frac{1}{20} l \text{ s/d } \frac{1}{28} l \quad (1)$$

D. Material Beton Prategang

Menurut SNI 2847:2019, material pembentuk beton prategang terdiri dari beton dan baja prategang.

Beton (*concrete*) adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran (*admixture*). Beton mutu tinggi adalah beton yang mempunyai kuat tekan silinder f'_c melebihi 60 MPa. Sedangkan beton normal adalah beton dengan berat isi $\pm 2400 \text{ kg/m}^3$, f'_c antara 20 MPa sampai dengan 60 MPa. Adapun kekuatan beton untuk struktur prategang SNI mensyaratkan tidak boleh kurang dari 30 MPa.

$$\text{Modulus elastisitas untuk beton normal, } E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

$$\text{Untuk nilai } w_c \text{ di antara } 1400 \text{ dan } 2560 \text{ kg/m}^3, E_c = w_c^{1,5} \cdot 0,043 \sqrt{f'_c} \quad (3)$$

$$\text{Modulus retak, } f_r = 0,62 \lambda \sqrt{f'_c} \quad (4)$$

ditentukan dari hasil pengujian atau diambil sebesar mutu baja yang disebutkan oleh fabrikator berdasarkan sertifikat fabrikasi yang resmi.

Tabel 2. Jenis Tulangan Prategang

Jenis Material	Nominal Diameter (mm)	Luas (mm ²)	Gaya Putus Minimum (kN)	Tegangan Tarik Minimum, f_{pu} (MPa)
Kawat (<i>wire</i>)	5	19,6	30,4	1550
	5	19,6	33,3	1700
	7	38,5	65,5	1700
7-wire strand super grade	9,3	54,7	102	1860
	12,7	100	184	1840
	15,2	143	250	1750
7-wire strand regular grade	12,7	94,3	165	1750
	23	415	450	1080
Bar	26	530	570	1080
	29	660	710	1080
	32	804	870	1080
	38	1140	1230	1080

Sumber: Perencanaan Struktur Beton Pratekan Untuk Jembatan

E. Analisis Gaya Prategang

Pemberian gaya prategang pada beton prategang akan memberikan tegangan tekan pada penampang. Tegangan ini memberikan perlawanan terhadap beban luar yang bekerja. Apabila gaya prategang bekerja tidak pada pusat penampang tetapi dengan eksentrisitas, maka ada tambahan tegangan akibat eksentrisitas tersebut. Besarnya tegangan maksimum pada serat penampang dapat dihitung menggunakan rumus:

$$f = -\frac{P}{A} \pm \frac{P \cdot e}{W} \pm \frac{M}{W} \quad (5)$$

F. Tegangan Izin Pada Beton Prategang

Tegangan izin pada beton prategang diatur di dalam SNI 2847:2019. Tegangan beton sesaat sesudah penyaluran gaya prategang (sebelum terjadinya kehilangan prategang sebagai fungsi waktu) dan tegangan pada beton saat beban layan (setelah mengalami semua kehilangan prategang) tidak boleh melampaui nilai pada persamaan berikut:

Tegangan izin tekan pada kondisi sesaat setelah transfer gaya prategang,

$$\text{Ujung tumpuan sederhana, } f_{ci} = 0,70 f'_c \quad (6)$$

$$\text{Semua lokasi lainnya, } f_{ci} = 0,60 f'_c \quad (7)$$

Tegangan izin tarik pada kondisi sesaat setelah transfer gaya prategang,

$$\text{Ujung tumpuan sederhana, } f_{ti} = 0,50 \sqrt{f'_c} \quad (8)$$

$$\text{Semua lokasi lainnya, } f_{ti} = 0,25 \sqrt{f'_c} \quad (9)$$

Tegangan izin tekan pada kondisi batas layan,

$$\text{Prategang + beban tetap, } f_{cs} = 0,45 f'_c \quad (10)$$

$$\text{Prategang + beban total, } f_{cs} = 0,60 f'_c \quad (11)$$

Tegangan izin tarik akibat beban layan dikelompokkan sebagai komponen struktur lentur kelas *U*, *T* dan *C* berdasarkan tegangan tarik f_i pada serat terjauh di daerah tarik.

Tabel 3. Klasifikasi Komponen Lentur Prategang Berdasarkan f_i

Perilaku penampang	Kelas	Batasan f_i
Tidak retak	<i>U</i> ^[1]	$f_i \leq 0,62 \sqrt{f'_c}$
Peralihan antara tak retak dan retak	<i>T</i>	$0,62 \sqrt{f'_c} < f_i \leq 1,0 \sqrt{f'_c}$
Retak	<i>C</i>	$f_i > 1,0 \sqrt{f'_c}$

^[1] Pelat dua arah prategang direncanakan sebagai kelas *U* dengan $f_i \leq 0,50 \sqrt{f'_c}$

Sumber: SNI 2847:2019

G. Perhitungan Kabel Prategang

Perhitungan kabel prategang atau tendon meliputi perhitungan lintasan inti kabel, sudut angkur, tata letak dan *trace* kabel prategang atau tendon.

Lintasan inti kabel prategang atau tendon,

$$y = \frac{4 \cdot f_i \cdot x}{L^2} (L - x) \quad (12)$$

Sudut angkur,

$$a = \tan^{-1} \frac{4f_i}{L} \quad (13)$$

Tata letak dan *trace* kabel prategang tendon,

$$z = z' - \frac{4f_i x}{L^2} (L - x) \quad (14)$$

H. Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan prategang adalah berkurangnya gaya yang bekerja pada tendon dalam tahap-tahap

pembebanan. Kehilangan prategang pada struktur beton prategang terjadi akibat sistem penegangan (kehilangan prategang langsung) maupun akibat pengaruh waktu.

Kehilangan prategang langsung disebabkan oleh gesekan kabel prategang, slip pengangkutan dan perpendekan elastis beton.

Kehilangan akibat gesekan kabel prategang,

$$\Delta f_{FR} = f_0 \left[1 - e^{-(\mu\alpha + KL)} \right] \quad (15)$$

Kehilangan akibat slip pengangkutan,

$$\Delta f_A = \frac{\Delta A}{L} E_{ps} \quad (16)$$

Kehilangan akibat perpendekan elastis beton,

$$\Delta f_{ES} = K_{es} f_{cir} n \quad (17)$$

Kehilangan prategang akibat pengaruh waktu disebabkan oleh perpendekan dari beton akibat susut beton, rangkai beton dan relaksasi baja.

Kehilangan akibat susut beton,

$$\Delta f_{SH} = 8,2 \times 10^{-6} K_{sh} E_{ps} \left(1 - 0,06 \frac{V}{S} \right) (100 - RH) \quad (18)$$

Kehilangan akibat rangkai beton,

$$\Delta f_{CR} = K_{cr} \frac{E_{ps}}{E_c} (f_{cir} - f_{csd}) \quad (19)$$

Kehilangan akibat relaksasi baja,

$$\Delta f_{RE} = \left[K_{re} - J (\Delta f_{SH} + \Delta f_{CR} + \Delta f_{ES}) \right] C \quad (20)$$

I. Kontrol Momen Nominal

Dalam mendesain suatu elemen struktur, kekuatan batas nominal lentur harus diperhatikan. Kekuatan batas nominal lentur adalah kekuatan penampang beton dalam menahan kombinasi beban terfaktor (beban *ultimate*).

1. Prosedur kompatibilitas regangan jika $f_{pe} = (P_{eff} / A_{ps}) < 0,50 f_{pu}$

Bila regangan dalam tendon prategang pada kondisi runtuh diketahui maka tegangan dalam tendon prategang menggunakan persamaan berikut:

Untuk *low relaxation strand* 250 ksi (ASTM A416),

$$\epsilon_{ps} \leq 0,0076 ; f_{ps} = 28800 \cdot 6,89 \epsilon_{ps} \text{ (MPa)} \quad (21)$$

$$\epsilon_{ps} > 0,0076 ;$$

$$f_{ps} = \left(250 - \frac{0,04}{\epsilon_{ps} - 0,0064} \right) \cdot 6,89 \text{ (MPa)} \quad (22)$$

Untuk *stress relieved strand* 270 ksi (ASTM A416),

$$\epsilon_{ps} \leq 0,0085 ; f_{ps} = 28800 \cdot 6,89 \epsilon_{ps} \text{ (MPa)} \quad (23)$$

$$\epsilon_{ps} > 0,0085 ;$$

$$f_{ps} = \left(270 - \frac{0,04}{\epsilon_{ps} - 0,007} \right) \cdot 6,89 \text{ (MPa)} \quad (24)$$

2. Prosedur pendekatan empirik jika $f_{pe} = (P_{eff} / A_{ps}) > 0,50 f_{pu}$

Prosedur ini secara umum lebih konservatif dan dapat digunakan sebagai pengganti perhitungan tegangan yang lebih akurat berdasarkan kompatibilitas regangan yang dihitung sesuai persamaan sebagai berikut:

$$f_{ps} = f_{pu} \left\{ 1 - \frac{\gamma_p}{\beta_1} \left[\rho_p \frac{f_{pu}}{f_c} + \frac{d f_y}{d_p J_c} (\rho - \rho') \right] \right\} \quad (25)$$

J. Kontrol Lentutan

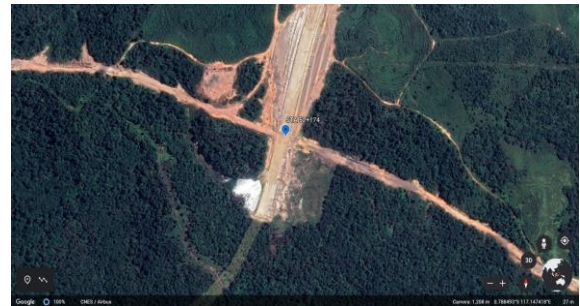
Berdasarkan SNI 2867:2019, lendutan harus dihitung dengan metode dan formula untuk lendutan elastis, dengan pertimbangan pengaruh retak dan tulangan pada kekakuan penampang. Lendutan yang dihitung tidak boleh melebihi batasan $l/240$.

3. METODOLOGI PENELITIAN

A. Data Proyek

Data perencanaan *Section Overpass* STA 52+174 Proyek Jalan Tol Balikpapan – Samarinda, sebagai berikut:

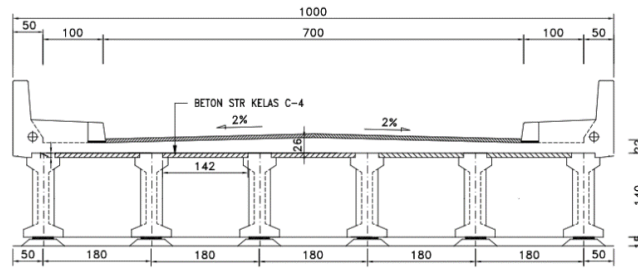
1. Jenis Jembatan = Beton Prategang
2. Jenis Girder = PCI Girder
3. Koordinat = 515674,72 N, 9913248,74 E
4. Panjang Jembatan = 85,2 m
5. Lebar Jembatan = 10,0 m
6. Lebar Jalur = 7,00 m
7. Lebar Trotoar = 1,50 m
8. Jarak Girder = 1,80 m



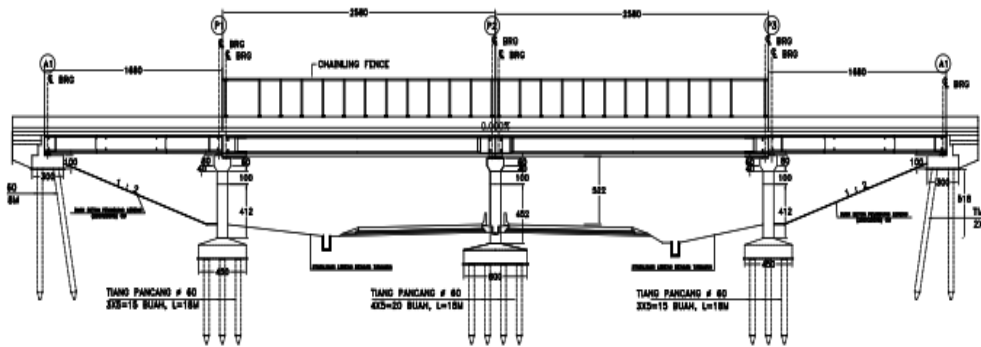
Gambar 1. Section Overpass STA 52+174



Gambar 2. Penampakan Section Overpass STA 52+174



Gambar 3. Potongan Overpass STA 52+174



Gambar 4. Design Drawing Overpass STA 52+174

B. Objek Penelitian

Objek yang diteliti pada penelitian ini adalah PC I girder yang digunakan pada struktur jembatan tersebut yang terbagi menjadi 2 tipe PC I Girder dengan panjang 25,80 m, dan 16,80 m dengan rincian sebagai berikut:

1. Concrete

f'_c (Service) = 43,00 MPa
 f_{ci} (Stressing) = 34,00 MPa

2. Prestressing Steel

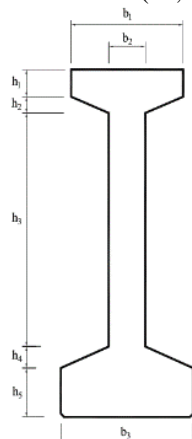
\varnothing PC Strand = 1/2" (12,7 mm)

Spec. Strand = ASTM-A416 Grade 270 (Low Relaxation)
UTS = 18700 kgf
Jacking Force = 75% UTS

3. Cast in Site Slab

f'_c (Slab) = 29,00 MPa

Dimensi PC I girder pada masing-masing span pada penelitian ini dijabarkan pada gambar 5 berikut.



Span (m)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	h ₃ (mm)	h ₄ (mm)	h ₅ (mm)
25,80	550	180	650	125	75	1075	100	225
16,80	350	170	650	75	75	1025	100	125

Gambar 5. Dimensi PC I Girder Overpass STA 52+174

C. Tahapan Penelitian

Adapun tahapan penelitian yang akan dilakukan dalam penelitian ini dijabarkan sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data perencanaan struktur jembatan dan profil girder dan studi literatur

terkait landasan teori dan metode perhitungan yang digunakan.

2. Mengolah dan menganalisa penampang profil girder yang digunakan.
3. Menganalisa pembebanan pada jembatan.

4. Melakukan analisa struktur pada masing-masing girder.
5. Menghitung kehilangan prategang yang terjadi.
6. Menghitung tegangan yang terjadi pada masing-masing girder.
7. Memeriksa momen ultimit yang terjadi akibat kombinasi pembebanan memenuhi batas syarat momen nominal.
8. Menghitung lendutan yang terjadi akibat masing-masing pembebanan dan kombinasi pembebanan memenuhi batas syarat lendutan.

$$h = \frac{1}{20} \cdot l \leq 1,60$$

$$h = \frac{1}{20} \cdot 25,80 = 1,29 < 1,60 \dots \dots \dots \text{(OK)}$$

Bentang *span* 16,80 m ($h = 1,40$ m)

$$h = \frac{1}{20} \cdot l \leq 1,40$$

$$h = \frac{1}{20} \cdot 16,80 = 0,84 < 1,40 \dots \dots \dots \text{(OK)}$$

Dari perhitungan pendekatan di atas dapat diambil kesimpulan bahwa tinggi aktual *PC I girder* yang digunakan memenuhi syarat minimum yang ditetapkan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Review Design PC I Girder

Perhitungan ini dilakukan sebagai kontrol dimensi *PC I girder* yang digunakan memenuhi syarat minimum yang ditetapkan. Perkiraan dimensi diambil menggunakan persamaan 1.

Bentang *span* 25,80 m ($h = 1,60$ m)

B. Analisa Penampang

Analisis penampang dibutuhkan untuk mengetahui luas, titik berat, momen inersia dan *modulus section* pada balok *girder* sebelum komposit dan setelah komposit. Analisa penampang ditampilkan pada tabel 4.

Tabel 4. Analisa Penampang

Uraian	<i>PC I Girder</i> 25,80 m		<i>PC I Girder</i> 16,80 m	
	Seb. Komposit	Set. Komposit	Seb. Komposit	Set. Komposit
$\Sigma A (m^2)$	0,477	0,846	0,342	0,708
$y_i (m)$	0,889	0,715	0,812	0,592
$y_b (m)$	0,711	1,175	0,588	1,098
$I_x (m^4)$	0,146	0,383	0,074	0,248
$W_i (m^3)$	0,164	0,535	0,092	0,420
$W'_i (m^3)$	-	0,773	-	0,668
$W_b (m^3)$	0,205	0,326	0,127	0,226

C. Analisa Pembebanan

Pada analisa pembebanan ini terdiri dari analisa beban mati, beban hidup, beban lingkungan dan menghitung momen yang

bekerja. Selanjutnya dilakukan perhitungan momen ultimit yang terjadi akibat kombinasi pembebanan. Analisa pembebanan ditampilkan pada tabel 5.

Tabel 5. Kombinasi Pembebanan

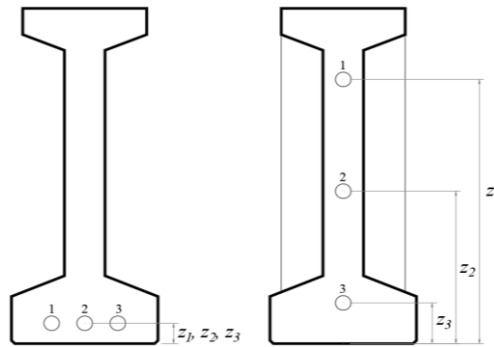
Kombinasi Pembebanan	Momen Ultimit (kNm)	
	<i>Span</i> 25,80 m	<i>Span</i> 16,80 m
Kuat I	7253,01	3352,25
Kuat II	6366,41	2888,72
Kuat III	3814,35	1425,21
Kuat IV	3263,28	1266,36
Kuat V	3545,68	1364,73
Ekstrem I	3492,06	1351,30
Ekstrem II	4371,54	1845,78
Daya Layan I	4894,01	2184,59
Daya Layan II	5315,53	2444,90
Daya Layan III	4207,67	1865,80
Daya Layan IV	2709,59	1017,84
Fatik	1608,28	817,61

D. Penentuan Posisi Tendon

Penentuan posisi dan jarak tendon pada masing-masing *girder* ditampilkan pada tabel 6.

Tabel 6. Jarak Tendon

Span 25,80 m			Span 16,80 m		
No. Tendon	Tengah Bentang (m)	Tumpuan (m)	No. Tendon	Tengah Bentang (m)	Tumpuan (m)
1	0,100	1,223	1	0,100	0,976
2	0,100	0,711	2	0,100	0,588
3	0,100	0,200	3	0,100	0,200



Gambar 6. Posisi Tendon

E. Kehilangan Prategang

Kehilangan prategang total yang terdiri dari kehilangan prategang langsung dan kehilangan

prategang akibat pengaruh waktu. Perhitungan kehilangan prategang total terbesar pada masing-masing bentang ditampilkan pada tabel 7.

Tabel 7. Kehilangan Prategang

LoP	Span 25,80 m	Span 16,80 m
Δf_{FR} (MPa)	217,75	202,65
Δf_A (MPa)	0,00	0,00
Δf_{ES} (MPa)	17,37	31,92
Δf_{SH} (MPa)	27,47	27,57
Δf_{CR} (MPa)	55,57	87,91
Δf_{RE} (MPa)	30,98	29,10
Δf_{TOT} (MPa)	349,15	379,16
Δf_{TOT} (%)	25,03%	27,18%

F. Kontrol Tegangan

Tegangan yang terjadi pada girder terdiri dari 4 tahap, yaitu kondisi awal sebelum kehilangan gaya prategang, sesaat setelah transfer gaya prategang, setelah plat lantai kendaraan selesai dicor, dan setelah plat lantai dan girder menjadi komposit.

Tegangan izin tekan pada kondisi sesaat setelah transfer gaya prategang,
 $f_{ci} = -0,60 f'_c = -0,60 \cdot 34,00 = -20,40$ MPa

Tegangan izin tarik pada kondisi sesaat setelah transfer gaya prategang,

$$f_{ti} = 0,25 \sqrt{f'_c} = 0,25 \sqrt{34,00} = 1,46 \text{ MPa}$$

Tegangan izin tekan saat beban layan pada kondisi prategang + beban tetap,
 $f_{cs} = -0,45 f'_c = -0,45 \cdot 43,00 = -19,35$ MPa

Tegangan izin tekan saat beban layan pada kondisi prategang + beban total,
 $f_{cs} = -0,60 f'_c = -0,60 \cdot 43,00 = -25,80$ MPa

Tegangan izin tarik saat beban layan,
 $f_{ts} = 0,62 \sqrt{f'_c} = 0,62 \sqrt{34,00} = 4,07$ MPa
 $f_{ts} = 1,00 \sqrt{f'_c} = 1,00 \sqrt{34,00} = 6,56$ MPa

Tabel 8. Kontrol Tegangan

Uraian	Span 25,80 m	Check	Span 16,80 m	Check
		Kondisi Awal		
f_i (MPa)	0,98	$< f_{ti}$ (OK)	0,53	$< f_{ti}$ (OK)
f_b (MPa)	-15,93	$> f_{ci}$ (OK)	-7,85	$> f_{ci}$ (OK)

Sesaat setelah transfer gaya prategang				
f_t (MPa)	-0,12	$> f_{cs}$ (OK)	-0,06	$> f_{cs}$ (OK)
f_b (MPa)	-12,50	$> f_{cs}$ (OK)	-6,16	$> f_{cs}$ (OK)
Setelah plat lantai dicor				
f_t (MPa)	-4,93	$> f_{cs}$ (OK)	-3,72	$> f_{cs}$ (OK)
f_b (MPa)	-8,65	$> f_{cs}$ (OK)	-3,51	$> f_{cs}$ (OK)
Plat dan girder menjadi komposit				
f_t (MPa)	-0,70	$> f_{cs}$ (OK)	-0,42	$> f_{cs}$ (OK)
f_t (MPa)	-1,58	$> f_{cs}$ (OK)	-0,83	$> f_{cs}$ (OK)
f_b (MPa)	-8,26	$> f_{cs}$ (OK)	-3,57	$> f_{cs}$ (OK)

Tegangan yang terjadi pada girder juga dihitung terhadap kombinasi pembebanan untuk menganalisa kemampuan girder tersebut mampu

menahan kombinasi pembebanan yang disyaratkan. Kombinasi pembebanan mengacu pada SNI 1725:2016.

Tabel 9. Kontrol Tegangan Terhadap Kombinasi Pembebanan

Tegangan	Span 25,80 m			Tegangan	Span 16,80 m		
	Σf (MPa)	Check $\sigma_{cs} \leq f \leq \sigma_{ts}$	Remarks		Σf (MPa)	Check $\sigma_{cs} \leq f \leq \sigma_{ts}$	Remarks
Kuat I							
f_t	-11,06	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas C	f_t	-6,94	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas C
f_t	-8,76	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-4,93	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	8,76	$f > \sigma_{ts}$		f_b	8,54	$f > \sigma_{ts}$	
Kuat II							
f_t	-9,41	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas T	f_t	-5,84	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas T
f_t	-7,61	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-4,24	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	6,04	$\sigma_{ts} \leq f \leq \sigma_{ts}$		f_b	6,49	$\sigma_{ts} \leq f \leq \sigma_{ts}$	
Kuat III							
f_t	-4,64	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U	f_t	-2,35	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U
f_t	-4,31	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-2,04	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	-1,79	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_b	0,02	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
Kuat IV							
f_t	-3,61	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U	f_t	-1,98	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U
f_t	-3,60	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-1,81	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	-3,48	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_b	-0,68	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
Kuat V							
f_t	-4,14	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U	f_t	-2,21	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U
f_t	-3,96	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-1,95	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	-2,61	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_b	-0,25	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
Ekstrem I							
f_t	-4,04	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U	f_t	-2,18	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U
f_t	-3,89	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-1,93	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	-2,78	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_b	-0,31	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
Ekstrem II							
f_t	-5,68	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U	f_t	-3,36	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U
f_t	-5,03	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-2,67	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	-0,08	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_b	1,88	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
Daya Layan I							
f_t	-10,92	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U	f_t	-8,42	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas T
f_t	-9,96	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-7,44	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	2,28	$f < \sigma_{ts}$ (OK)		f_b	4,28	$\sigma_{ts} \leq f \leq \sigma_{ts}$	
Daya Layan II							
f_t	-7,44	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas U	f_t	-4,78	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	Kelas T
f_t	-6,25	$\sigma_{cs} < f$ (OK)		f_t	-3,57	$\sigma_{cs} < f$ (OK)	
f_b	2,82	$f < \sigma_{ts}$ (OK)		f_b	4,53	$\sigma_{ts} \leq f \leq \sigma_{ts}$	

Daya Layan III			Daya Layan III		
f_t	-9,63	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_t	-7,66	$\sigma_{cs} < f(OK)$
f_t	-9,08	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_t	-6,96	$\sigma_{cs} < f(OK)$
f_b	0,18	$f < \sigma_{ts}(OK)$	f_b	2,87	$f < \sigma_{ts}(OK)$
Daya Layan IV			Daya Layan IV		
f_t	-2,58	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_t	-1,38	$\sigma_{cs} < f(OK)$
f_t	-2,88	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_t	-1,44	$\sigma_{cs} < f(OK)$
f_b	-5,17	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_b	-1,78	$\sigma_{cs} < f(OK)$
Fatik (TD dan TR)			Fatik (TD dan TR)		
f_t	-0,52	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_t	-0,91	$\sigma_{cs} < f(OK)$
f_t	-1,46	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_t	-1,14	$\sigma_{cs} < f(OK)$
f_b	-8,55	$\sigma_{cs} < f(OK)$	f_b	-2,67	$\sigma_{cs} < f(OK)$

Berdasarkan tabel 9 diketahui pada sebagian besar kombinasi pembebanan, tegangan yang terjadi akibat kombinasi pembebanan adalah aman dengan perilaku penampang beton prategang dikategorikan sebagai kelas *U* dengan asumsi perilaku penampang prategang utuh atau tidak retak. Namun di beberapa kombinasi pembebanan diketahui terdapat perilaku penampang beton prategang yang dikategorikan sebagai kelas *C* ($f > 1,0\sqrt{f'_c}$) dengan asumsi perilaku penampang prategang retak dan kelas *T* ($0,62\sqrt{f'_c} < f < 1,0\sqrt{f'_c}$) dengan asumsi perilaku penampang prategang peralihan antara utuh dan retak. Bila penampang prategang merupakan kelas *C* dan kelas *T*, maka dibutuhkan tulangan tarik non prategang

pada daerah lentur terjadinya retak untuk mengakomodir tegangan tarik yang terjadi.

G. Kontrol Momen Nominal

Perhitungan momen nominal dilakukan untuk menganalisa kemampuan penampang struktur dalam menerima beban-beban yang bekerja akibat kombinasi pembebanan yang disyaratkan.

Momen nominal,

$$\text{Span } 25,80 \text{ m, } \phi M_n = 12722,69 \text{ kNm}$$

$$\text{Span } 16,80 \text{ m, } \phi M_n = 11106,93 \text{ kNm}$$

$$\text{Syarat: } \Sigma M_u \leq \phi M_n$$

Tabel 10. Kontrol Momen Nominal

Kombinasi Pembebanan	ΣM_u (kNm)			
	Span 25,80 m	Check	Span 16,80 m	Check
Kuat I	4017,09	Aman	2276,16	Aman
Kuat II	3130,48	Aman	1812,63	Aman
Kuat III	578,43	Aman	349,12	Aman
Kuat IV	27,36	Aman	190,27	Aman
Kuat V	309,76	Aman	288,64	Aman
Ekstrem I	256,14	Aman	275,21	Aman
Ekstrem II	1135,62	Aman	769,69	Aman
Daya Layan I	1658,09	Aman	1108,50	Aman
Daya Layan II	2079,61	Aman	1368,81	Aman
Daya Layan III	971,75	Aman	789,71	Aman
Daya Layan IV	-526,33	Aman	-58,25	Aman
Fatik	-1627,65	Aman	-258,48	Aman

H. Kontrol Lendutan

Lendutan yang terjadi pada balok komposit diakibatkan oleh beban-beban yang bekerja pada kondisi *service*. Lendutan yang terjadi pada balok komposit akibat beban yang bekerja dimasukkan ke dalam kombinasi pembebanan untuk mendapatkan lendutan *ultimit*.

Lendutan maksimal yang terjadi,

$$\text{Span } 25,80 \text{ m, } \delta_{maks} = 0,108 \text{ m}$$

$$\text{Span } 16,80 \text{ m, } \delta_{maks} = 0,070 \text{ m}$$

$$\text{Syarat: } \delta_{tot} \leq \delta_{maks}$$

Tabel 11. Kontrol Lendutan

Kombinasi Pembebanan	δ_{tot} (m)			
	Span 25,80 m	Check	Span 16,80 m	Check
Kuat I	0,0322	Aman	0,0075	Aman
Kuat II	0,0250	Aman	0,0059	Aman
Kuat III	0,0046	Aman	0,0011	Aman
Kuat IV	-0,0003	Aman	0,0005	Aman
Kuat V	0,0023	Aman	0,0008	Aman

Ekstrem I	0,0018	Aman	0,0008	Aman
Ekstrem II	0,0088	Aman	0,0025	Aman
Daya Layan I	0,0126	Aman	0,0036	Aman
Daya Layan II	0,0158	Aman	0,0044	Aman
Daya Layan III	0,0068	Aman	0,0025	Aman
Daya Layan IV	-0,0052	Aman	-0,0003	Aman
Fatik	-0,0155	Aman	-0,0008	Aman

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa desain *PC I girder Section Overpass* STA 52+174 diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Dimensi penampang *PC I girder* yang digunakan berdasarkan perhitungan pendekatan memenuhi syarat minimum yang ditetapkan.
2. Kehilangan prategang terbesar yang terjadi pada *span* 25,80 m sebesar 25,03%, sedangkan pada *span* 16,80 m kehilangan prategang terbesar yang terjadi sebesar 27,18%.
3. Pada tahap transfer, kondisi awal hingga kondisi plat lantai dan *girder* menjadi komposit, tegangan yang terjadi pada serat atas dan serat bawah lebih besar daripada tegangan ijin, sehingga *girder* tersebut mampu memikul beban yang bekerja.
4. Tegangan yang terjadi akibat kombinasi pembebanan adalah aman dengan perilaku penampang beton prategang dikategorikan sebagai kelas *U* dengan asumsi perilaku penampang prategang utuh atau tidak retak. Namun dibebberapa kombinasi pembebanan diketahui terdapat perilaku penampang beton prategang yang dikategorikan sebagai kelas *C* ($f > 1,0\sqrt{f'_c}$) dengan asumsi perilaku penampang prategang retak dan kelas *T* ($0,62\sqrt{f'_c} < f < 1,0\sqrt{f'_c}$) dengan asumsi perilaku penampang prategang peralihan antara utuh dan retak. Bila penampang prategang merupakan kelas *C* dan kelas *T*, maka dibutuhkan tulangan tarik non prategang pada daerah lentur terjadinya retak untuk mengakomodir tegangan tarik yang terjadi.
5. Momen ultimit maksimum yang terjadi pada *span* 25,80 m akibat kombinasi pembebanan KUAT I sebesar 4017,09 kNm kurang dari momen nominal sebesar 12722,69 kNm, sedangkan momen ultimit maksimum yang terjadi pada *span* 16,80 m akibat kombinasi pembebanan KUAT I sebesar 2276,16 kNm kurang dari momen nominal sebesar 11106,93 kNm.
6. Lendutan maksimum yang terjadi pada *span* 25,80 m akibat kombinasi pembebanan KUAT I sebesar 32,2 mm kurang dari lendutan maksimum ijin sebesar 108 mm, sedangkan lendutan maksimum yang terjadi pada *span* 16,80 m akibat kombinasi pembebanan KUAT I sebesar 7,5 mm kurang dari momen nominal sebesar 70 mm.
7. Dapat disimpulkan *PC I girder* yang digunakan pada *Section Overpass* STA 52+174 Proyek Jalan Tol Balikpapan-Samarinda aman terhadap parameter analisa yang dilakukan.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] AASHTO (2012) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- [2] Binamarga (2011) Manual Konstruksi dan Bangunan 021/BM/2011, Direktorat Jenderal Bina Marga, Jakarta
- [3] BSN (2004) RSNI T-12-2004 Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- [4] BSN (2016) SNI 1725:2016 Pembebanan Untuk Jembatan, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- [5] BSN (2016) SNI 2833:2016 Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa, Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- [6] BSN (2019) SNI 2847:2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung dan Penjelasan (ACI 318M-14 dan ACI 318RM-14, MOD), Badan Standarisasi Nasional, Jakarta.
- [7] Budiadi, A. (2008) Desain Praktis Beton Prategang, Penerbit Andi, Yogyakarta.
- [8] Dolan, C. W., dan Hamilton, H. R. T. (2018) Prestressed Concrete Building, Design, and Construction, Springer, Switzerland.
- [9] Hong, S., (2017) Effect of Prestress Levels and Jacking Methods on Friction Losses in Curved Prestressed Tendons, Sungkyunkwan University, Gyeonggi.
- [10] Lin, T. Y., dan Burns H. (1988) Desain Struktur Beton Prategang, (Edisi Ketiga, Jilid 1), Erlangga, Jakarta.
- [11] Nawy, E. G. (2001) Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar, (Edisi Ketiga, Jilid 1), Erlangga, Jakarta.
- [12] PCI (2010) PCI Design Handbook Precast and Prestressed Concrete, (Seventh Edition), Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago.
- [13] Rahmawati, C., Zainuddin, Safwanda, N., dan Is S. (2016) Analysing the Route of PCI Girder-Type Prestressed Concrete Tendons, International Journal of Science and Research (IJSR), 1553-1559.
- [14] Raju, N. K. (1989) Beton Prategang, (Edisi Kedua), Erlangga, Jakarta.
- [15] Rizkia, S. R., Suyadi, dan Husni, H. R. (2017) Analisis Perbandingan Kehilangan Prategang akibat Metode Stressing Satu Arah dan Dua Arah pada Jembatan Beton Prategang, JRSDD, 5(3), 1-12.
- [16] Sari, Y. I. (2018) Re-Design Struktur PCI Girder Pada Overpass Kranggan (STA. 72+237) Proyek Jalan Tol Semarang – Solo Ruas Salatiga – Kartasura, Sekolah Tinggi Teknik-PLN, Jakarta.
- [17] Sudarmono (2016) Struktur Beton Prategang Teori dan Aplikasi, (Edisi Kesepuluh), Badan Penerbit Universitas Diponegoro, Semarang.