

STUDI PERBANDINGAN PENGGUNAAN PCU GIRDER DAN PCI GIRDER PADA STRUKTUR ATAS JEMBATAN JURANG GEMPAL, WONOGIRI

Basty Pratama Putra¹, Yunalia Muntafi², Suharyatmo³

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia

email: pratamabastya@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia

email: yunalia@uii.ac.id

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Indonesia

email: suharyatmo@yahoo.co.id

ABSTRACT

The Bridge is one of the infrastructure buildings that support social, economic and industrial growth of a region. Jurang Gempal Bridge in Wonogiri is the main highway access that connects the Solo-Wonogiri Road. The main material of that bridge is steel which has corrosive prone nature so that need a routine maintenance. In contrast to steel, concrete material is easier to maintain and better to reduce shocks. Therefore, this research will be use concrete material that is PCU Girder and PCI Girder on the upper structure of the bridge. The research aims to compare the results of the design related to required total Girder area, number of tendons and reinforcement of the bridge designed with PCU Girder and PCI Girder from the Binamarga Office of Central Java. Research begins by surveying the location of the bridge, collecting the data, then designing and comparing the bridge upper structure design with both the PCU Girder and PCI Girder. The research shows that the design of PCU Girder bridge requires less girder than the PCI Girder, but the total area of the Girder is 36% greater than PCI Girder. Likewise, the need of tendons, moment, and shear reinforcement of PCU Girder bridge is more than the PCI Girder bridge.

Keywords: bridge, reinforcement, tendon, PCU Girder, PCI Girder

PENDAHULUAN

Jembatan Jurang Gempal yang berada di kecamatan Wonogiri, Kabupaten Wonogiri merupakan jembatan utama penghubung Solo-Ponorogo yang merupakan jalan provinsi yang juga menghubungkan jalan ke arah Pacitan, Jawa Timur. Jembatan Jurang Gempal yang melintasi sungai Bengawan Solo merupakan sarana vital transportasi Kabupaten Wonogiri. Jembatan tersebut menggunakan rangka baja dan usia jembatan sudah lebih dari 40 tahun.

Material utama yang digunakan pada jembatan Jurang Gempal adalah material baja. Konstruksi baja memerlukan pemeliharaan rutin dan biaya yang tidak sedikit, karena baja rawan korosif.

Pada penelitian ini akan dilakukan kajian perbandingan penggunaan material beton yaitu PCU Girder dan PCI Girder untuk struktur atas jembatan tersebut. Struktur beton tidak memerlukan pemeliharaan khusus dan lebih baik dalam hal meredam getaran/goncangan dibanding baja.

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui perbandingan hasil desain terkait kebutuhan luas total Girder, kebutuhan jumlah tendon dan penulangan pada struktur atas jembatan Jurang Gempal dengan menggunakan PCU Girder dan PCI Girder.

STUDI ANALISIS DAN DESAIN JEMBATAN

Secara umum suatu jembatan berfungsi untuk melayani arus lalu lintas dengan baik,

dalam perencanaan dan perancangan jembatan sebaiknya mempertimbangkan fungsi kebutuhan transportasi, persyaratan teknis dan estetika-arsitektural yang meliputi: Aspek lalu lintas, Aspek teknis, Aspek estetika. (Supriyadi dan Muntohar, 2007).

Penelitian mengenai jembatan telah banyak dilakukan sehingga memberikan banyak manfaat dan dapat menjadi referensi bagi penelitian ini. Penelitian relevan yang pernah dilakukan antara lain sebagai berikut.

1. Cut Retno Masnul (2009), melakukan penelitian tentang Analisa *Prestress (Post-Tension)* Pada *Precast Concrete U Girder* Pada Jembatan *Fly over* Amplas Medan. Dari hasil analisa terhadap *PCU Girder* menunjukkan bahwa *Girder* bentuk U dengan mutu plat yang telah direvisi pada proyek pembangunan *Fly over* Amplas mampu menerima beban rencana sebesar 1748.28 t/m dengan tegangan negatif saat servis 149.16 kg/cm² yang nilainya lebih besar dari sebelum revisi yaitu 123.61 kg/cm².
2. Dini Fitria Annur dan Johannes Tarigan (2013), melakukan Perencanaan *Precast Concrete I Girder* pada Jembatan *Prestressed Post-tension* dengan Bantuan Program Microsoft Office Excel. Dari hasil perhitungan, total kehilangan prategang yang terjadi sebesar 19.138%. Pada hasil perhitungan terdapat perbedaan hasil antara perhitungan secara manual dan perhitungan dengan menggunakan alat bantu software, oleh karena itu disarankan agar para pendesain berikutnya menggunakan *software* dengan ketelitian yang jauh lebih baik.
3. Andri Febrianto (2015), melakukan Perencanaan *Fly over* Jombor Menggunakan Struktur Beton Prategang *Jenis PCI Girder (Prestressed Concrete I Girder)*. Hasil penelitian jembatan meliputi gelagar yang berbentuk *I-Girder* dengan tinggi 2,1m. Struktur bawah meliputi abutment, pilar, pile cap, dan fondasi bored pile. Jembatan layang

Jombor didesain menggunakan 7 bentang dengan panjang tiap bentang 40 m dan lebar 9 m.

KONSEP BETON PRATEGANG

Hadipratomo (2006) menjelaskan bahwa seperti halnya beton bertulang, beton prategang juga merupakan struktur komposit antara dua bahan, ialah beton dan baja tetapi dengan mutu tinggi. Baja yang dipakai disebut *tendon* yang dikelompokkan dan membentuk kabel.

Menurut Lin T.Y., dan Burns Ned H., (2000) dalam buku “Struktur Beton Prategang”, ada tiga konsep yang dapat digunakan untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang yaitu sebagai berikut.

1. Sistem prategang untuk mengubah beton menjadi elastis
2. Sistem prategang untuk mencapai keseimbangan beban
3. Sistem prategang untuk kombinasi baja mutu tinggi dengan beton

Sistem Penarikan Baja Prategang

1. Pratarik dan pengangkuran ujung
 Pada sistem pratarik, baja prategang ditarik/diregangkan terlebih dahulu dan dijangkarkan pada tembok/dinding penahan (*bulkhead*), baru kemudian beton dicor. Setelah beton mencapai umur/kekuatan tertentu, baja prategang menekan komponen/balok. Transfer gaya prategang umumnya melalui ikatan/lekatan antara baja prategang dengan beton yang mengelilinginya (Aboe, A.K., 2006).

2. Paskatarik metode penarikan kabel
 Sistem paskatarik merupakan kebalikan sistem pratarik. Pada cara ini pertama-tama beton dicor/dicetak terlebih dahulu, dengan baja prategang sesuai alinyemen yang direncanakan terletak di dalam selongsong juga ikut tercor. Setelah beton mencapai umur/kekuatan tertentu, baja prategang ditarik dan kemudian dijangkarkan/diangkurkan pada ujung komponen. Transfer gaya prategang pada sistem ini melalui angkur (Aboe, A.K., 2006).

Pembebanan

Peraturan tentang pembebanan jembatan di Indonesia mengacu pada Peraturan Standar Pembebanan Untuk Jembatan RSNI T-02-2005, Standar Perencanaan Gempa Untuk

Jembatan SNI 2833-2008, dan Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan RSNI T-12-2004. Kombinasi pembebanan yang digunakan dalam penelitian sesuai dengan RSNIT-02-2005 dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kombinasi Pembebanan

Aksi / Beban	Simbol	Kombinasi pembebanan				
		1	2	3	4	5
A. Aksi Permanen						
1. Berat sendiri	MS	√	√	√	√	√
2. Beban Mati Tambahan	MA	√	√	√	√	√
3. Susut dan Rangkak	SR	√	√	√	√	√
4. Prategang	PR	√	√	√	√	√
B. Aksi Transien						
1. Beban Lajur "D"	TD	√	√		√	√
2. Gaya Rem	TB	√				
3. Pejalan Kaki	TP		√			
C. Aksi Lingkungan						
1. Beban Angin	EW	√			√	
2. Beban Gempa	EQ					√

PERENCANAAN STRUKTUR ATAS JEMBATAN

Perencanaan struktur atas jembatan meliputi perencanaan tiang sandaran, slab lantai kendaraan, plat injak dan balok prategang dengan bentang 40,8 meter.

Perencanaan Dinding Pagar Tepi (Barrier)

Pada penelitian ini, dinding pagar tepi jembatan direncanakan dengan tinggi 1,2 m dari muka aspal. Untuk perencanaan dinding pagar tepi dilakukan perhitungan-perhitungan sebagai berikut ini.

1) Pembebanan dinding pagar tepi

Perhitungan dinding pagar tepi menggunakan tahapan dan persamaan:

Perhitungan gaya geser ultimate rencana:

$$H = w' \cdot L \tag{1}$$

$$V_u = K \cdot V \tag{2}$$

Perhitungan momen *ultimate* rencana:

$$M = H \cdot y \tag{3}$$

$$M_u = K \cdot M \tag{4}$$

dengan:

w' = beban rencana horizontal pada dinding pagar tepi

L = jarak antara dinding pagar tepi

y = lengan terhadap sisi bawah dinding pagar tepi

H = gaya horizontal pada dinding pagar tepi

M = momen pada dinding pagar tepi

K = faktor beban ultimate

2) Perencanaan tulangan lentur

Perhitungan tulangan dinding pagar tepi dengan menggunakan rumus-rumus dan tahapan sebagai berikut:

Momen nominal dihitung dengan rumus:

$$M_n = \frac{M}{\phi} \tag{5}$$

Setelah didapat Momen nominal (M_n) maka dicari faktor tahanan momen dengan rumus seperti berikut.

$$R_n = \frac{M}{(b \cdot d^2)}, R_n < R_{max} \tag{6}$$

Dengan faktor tahanan momen maksimum,

$$R_{max} = 0,75 \cdot \rho_b \cdot f_y \left(1 - \frac{0,5 \cdot 0,75 \cdot \rho_b \cdot f_y}{0,85 \cdot f'c} \right) \tag{7}$$

Dan rasio tulangan yang memberikan kondisi regangan seimbang,

$$\rho_b = \beta_1 \cdot \frac{0,85 \cdot f'c}{f_y} \cdot \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad (8)$$

Rasio tulangan yang diperlukan,

$$\rho = 0,85 \cdot \frac{f'c}{f_y} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \cdot Rn}{(0,85 \cdot f'c)}} \right) \quad (9)$$

Rasio tulangan yang digunakan harus lebih besar atau sama dengan ρ_{min} dan harus lebih kecil atau sama dengan ρ_{max} . Adapun rumus untuk ρ_{min} dan ρ_{max} seperti berikut.

$$\rho_{min} = \left(\frac{1,4}{f_y} \right)$$

$$\rho_{max} = 0,75 \cdot \rho_b$$

Ratio tulangan pakai, $\rho_{min} < \rho < \rho_{max}$

Setelah diperoleh rasio tulangan yang memenuhi syarat, maka dapat dihitung luas tulangan pakai dengan rumus seperti berikut.

$$\text{Luas tulangan pakai, } A_s = \rho \cdot b \cdot d \quad (10)$$

Setelah didapat luas tulangan pakai, maka dapat dicari jumlah tulangan yang dibutuhkan (n) dengan cara membagi luas tulangan pakai (A_s) dengan luas tulangan yang ditentukan. Jumlah tulangan yang diperlukan dihitung dengan rumus:

$$n = \frac{A_s}{\frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2} \quad (11)$$

dengan:

$f'c$: kuat tekan beton

f_y : tegangan leleh baja

b : lebar dinding pagar tepi

d : tebal efektif dinding pagar tepi

D : diameter tulangan yang digunakan

3) Perencanaan tulangan geser

Untuk menentukan tulangan geser tiang sandaran digunakan rumus dan tahapan sebagai berikut :

Gaya geser *ultimate*

$$V_u = \frac{M_u}{L} \quad (12)$$

Kuat geser nominal beton

$$V_c = \frac{\sqrt{f'c}}{6} b \cdot d \quad (13)$$

Kuat geser yang harus ditahan oleh baja tulangan geser (V_s) dengan rumus sebagai berikut:

$$V_s = \frac{V_u}{\phi} - V_c \quad (14)$$

Luas tulangan geser sengkang

$$A_v = n \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (15)$$

Jarak tulangan geser yang diperlukan

$$s = A_v \cdot f_y \cdot \frac{d}{V_s} \quad (16)$$

dengan :

V_u = gaya geser *ultimate* rencana (2.11)

$f'c$ = kuat tekan beton

f_y = tegangan leleh baja (2.12)

b = lebar dinding pagar tepi

d = tebal efektif dinding pagar tepi

D = diameter tulangan yang digunakan

Perencanaan Lantai (Slab) Jembatan

Perencanaan tulangan pada plat lantai sama seperti perhitungan tulangan dinding pagar tepi, ditambah hitungan tulangan susut yang berfungsi mencegah terjadinya susut atau retak-retak pada pelat lantai. Rumus untuk mencari luas tulangan susut yang dibutuhkan adalah seperti pada Tabel 2.

Tabel 2. Luas Tulangan Susut yang Dibutuhkan

Mutu Baja (f_y)	Luas Tulangan Susut = A_{sst}
\leq BJTD - 30	0,0020.b.h
BJTD - 40	0,0018.b.h
\geq BJTD - 40	$0,0018.b.h \frac{400}{f_y}$

Sumber: SNI-03-2847-2002

Perencanaan Balok Prategang

Menurut SK-SNI-03-1726-2002 pasal 3.11.4, tegangan ijin beton untuk komponen struktur lentur dan tendon prategang sebagai berikut ini.

1. Tegangan ijin beton saat transfer untuk struktur lentur tidak boleh melebihi nilai berikut:

a. serat terluar mengalami tegangan tekan (f_{ci}) $\leq 0,60 \cdot f'ci$

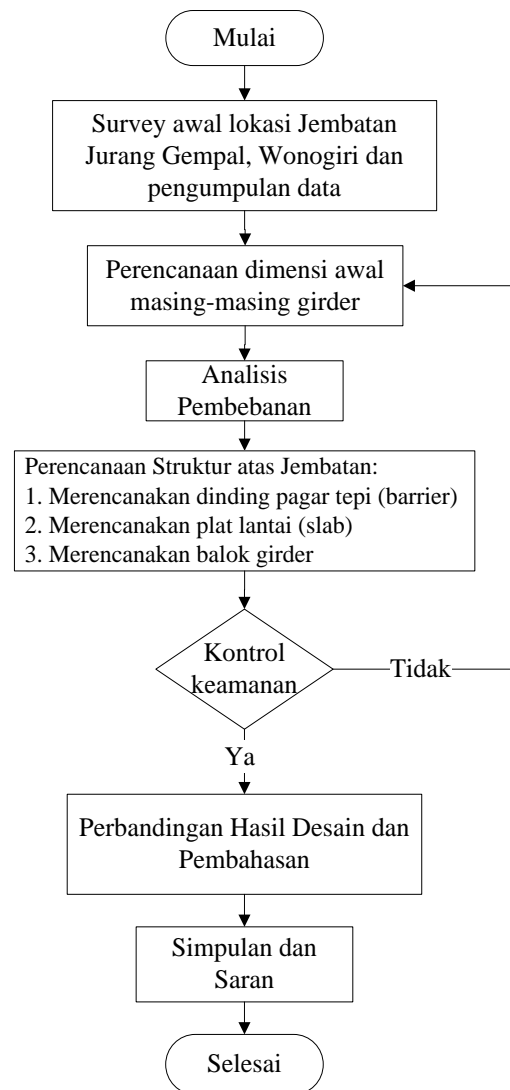
- b. serat terluar mengalami tegangan tarik $(f_{ti}) \leq 0,25 \cdot \sqrt{f'c}$
- 2. Tegangan ijin beton saat akhir untuk struktur lentur tidak boleh melampaui nilai berikut:
 - a. serat terluar mengalami tegangan tekan $(f_{cs}) \leq 0,45 \cdot f'c$
 - b. serat terluar mengalami tegangan tarik $(f_{ts}) \leq 0,50 \cdot \sqrt{f'c}$
- 3. Tegangan ijin tarik tendon prategang (f_{ps}) tidak boleh melampaui nilai berikut:
 - a. Akibat gaya pengangkutan tendon $\leq 0,94 \cdot f_{py}$, tetapi tidak lebih besar dari $0,85 \cdot f_{pu}$.
 - b. Sesaat setelah pemindahan gaya pratekan $\leq 0,82 \cdot f_{py}$, tetapi tidak lebih besar dari $0,74 \cdot f_{pu}$.
 - c. Tendon paskatarik pada daerah angkur dan sambungan sesaat setelah penyaluran gaya $\leq 0,70 f_{pu}$.

METODOLOGI

Tahapan penelitian diawali dengan survey lokasi jembatan dan mengumpulkan data, kemudian melakukan desain dengan PCU Girder dan membandingkannya dengan hasil desain jembatan dengan PCI Girder. Spesifikasi desain sebagai berikut.

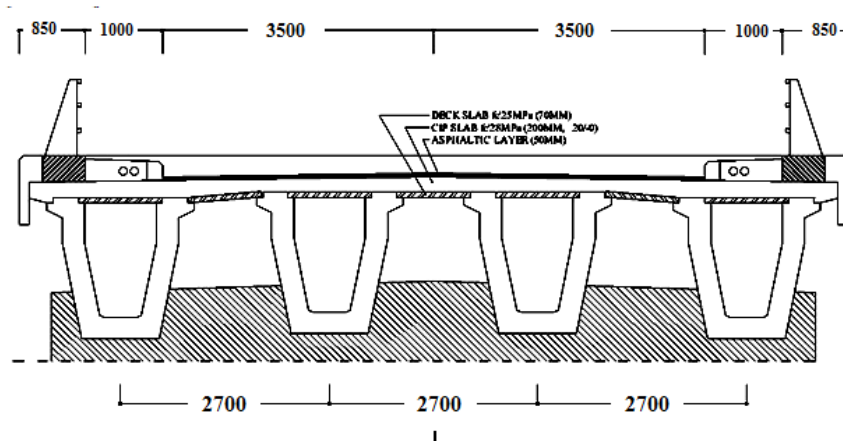
1. Jembatan tipe 1 kelas A dari standar bangunan atas jembatan Departemen Pekerjaan Umum (DPU).
2. Gelagar yang digunakan berupa gelagar profil U dengan bentang 40,8 m.
3. Beton prategang digunakan mutu beton K-600 setara dengan $f'c = 49,8$ MPa.
4. Beton bertulang digunakan mutu beton K-350 setara dengan $f'c = 29,05$ MPa digunakan pada bagian *barrier* dan plat lantai (*slab*)
5. Untuk $\phi \geq 13$ mm digunakan $f_y = 390$ MPa
6. Untuk $\phi < 13$ mm digunakan $f_y = 240$ MPa
7. Struktur atas jembatan yang digunakan untuk jalan raya berupa gelagar beton prategang balok sederhana.

Diagram alir penelitian disajikan pada Gambar 1.

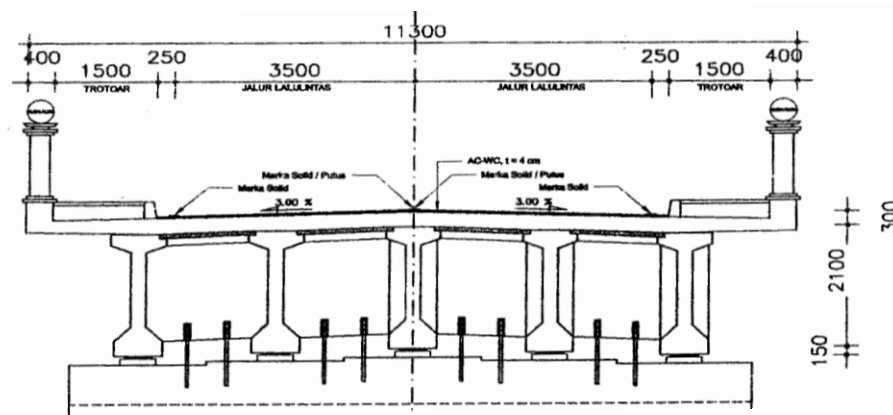


Gambar 1. Flow Chart Penelitian

Analisis struktur jembatan dilakukan dengan program SAP 2000 v.11 dan Ms. Excel 2013. Penampang melintang jembatan dengan desain PCU Girder dan PCI Girder disajikan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Penampang Melintang Jembatan PCU Girder



Gambar 3. Penampang Melintang Jembatan PCI Girder

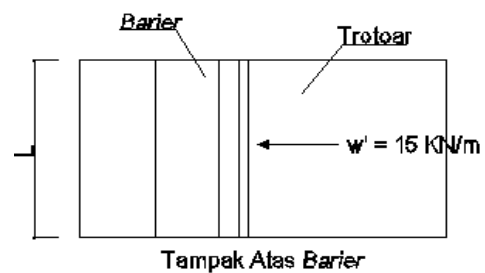
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perencanaan Dinding Tepi (Barrier)

Data yang digunakan dalam perencanaan dinding pagar tepi adalah sebagai berikut:

- Beban horizontal, $w' = 15,0 \text{ kN/m}$
- Jarak tinjauan dinding pagar tepi, $L = 1 \text{ m}$
- Tinggi *barier* dari permukaan plat $y = 1,2 \text{ m}$

Perhitungan pembebanan sebagai berikut:
 Gaya bekerja pada dinding pagar tepi (H)
 $H = w' \cdot L = 15,0 \cdot 1 = 15,0 \text{ kN}$
 Lengan terhadap sisi bawah dinding pagar tepi, $y = 1,2 \text{ m}$
 Momen pada dinding (M_{TP})
 $M_U = H \cdot y = 15,0 \cdot 1,2 = 18,0 \text{ kNm}$
 Momen *ultimate* rencana, $M_U = 18,0 \text{ kNm}$
 Bentuk dari perencanaan dinding pagar tepi (*barier*) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Desain dinding pagar tepi

1) Desain Tulangan Pokok

Luas tulangan pokok:

$$A_s = \rho \cdot b \cdot d = 0,0036 \cdot 1000 \cdot 380,5 = 1365,897 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan pokok D13,

$$A_d = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 13^2 = 132,732 \text{ mm}^2$$

Jarak tulangan yang diperlukan:

$$s = \frac{Ad \cdot b}{As} = \frac{132,7323 \cdot 1000}{13665,897} = 97,176 \text{ mm}$$

Jadi dipakai tulangan pokok D13-90

2) Desain Tulangan Susut

Jumlah tulangan susut/tulangan arah memanjang jembatan dapat diambil 50% dari tulangan pokok. Ketentuan ini sesuai dengan RSNIT-12-2004 Pasal 5.5.4.c.

$$As' = 50\% \cdot As = 0,5 \cdot 1365,897 = 682,947 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan susut D13

Jarak tulangan yang diperlukan:

$$s = \frac{Ad \cdot b}{As} = \frac{132,7323 \cdot 1000}{682,9847} = 194,3518 \text{ mm}$$

Jadi dipakai tulangan susut D16 – 180

3) Desain Tulangan Geser

Momen ultimate rencana, $M_u = 18 \text{ kN}$

Gaya geser *ultimate* rencana:

$$V_u = \frac{18}{L} = \frac{18}{1} = 18 \text{ kN} = 18000 \text{ N}$$

$$V_c = \frac{1}{6} \cdot \sqrt{f'c} \cdot b \cdot d$$

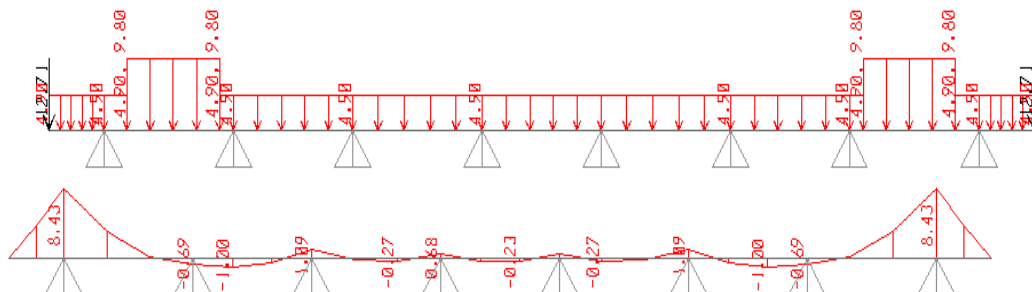
$$= \frac{1}{6} \cdot \sqrt{29,05} \cdot 1000 \cdot 3800,5 = 341803,5 \text{ N}$$

Karena $\emptyset \cdot V_c > V_u$, maka tidak perlu menggunakan tulangan geser. Untuk mempermudah pemasangan tulangan, digunakan tulangan sengkang $\emptyset 6$ -300 mm.

Perencanaan Plat Lantai (Slab) Jembatan

1) Berat sendiri (MS)

Momen maksimum akibat berat sendiri (M_{MS}) dengan asumsi semua tumpuan dianggap sendi seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Momen Maksimal Analisis dengan SAP 2000 v.11 Beban "MS"

Dari hasil analisis dengan SAP 2000, diperoleh momen tumpuan dan lapangan berat sendiri "MS" sebagai berikut:

$$M_{MS} \text{ Tumpuan} = -8,43 \text{ kNm}$$

$$M_{MS} \text{ Lapangan} = 1,0 \text{ kNm}$$

Momen *ultimate* rencana (M_u):

$$Mu = K_{MS} \cdot M_{MS}$$

$$Mu_{Tumpuan} = K_{MS} \cdot M_{MSTumpuan}$$

$$= 1,3 \cdot -8,43 \text{ kNm}$$

$$= -10,959 \text{ kNm}$$

$$Mu_{Lapangan} = K_{MS} \cdot M_{MSLapangan}$$

$$= 1,3 \cdot 1,0 \text{ kNm} = 1,3 \text{ kNm}$$

2) Beban Mati Tambahan (MA)

Momen maksimum akibat berat tambahan (M_{MA}) dengan asumsi semua tumpuan dianggap sendi seperti Gambar 6., sehingga diperoleh momen tumpuan dan lapangan berat mati tambahan "MA" dari analisis SAP 2000 sebesar:

$$M_{MA} \text{ Tumpuan} = -0,46 \text{ kNm}$$

$$M_{MA} \text{ Lapangan} = 0,2 \text{ kNm}$$

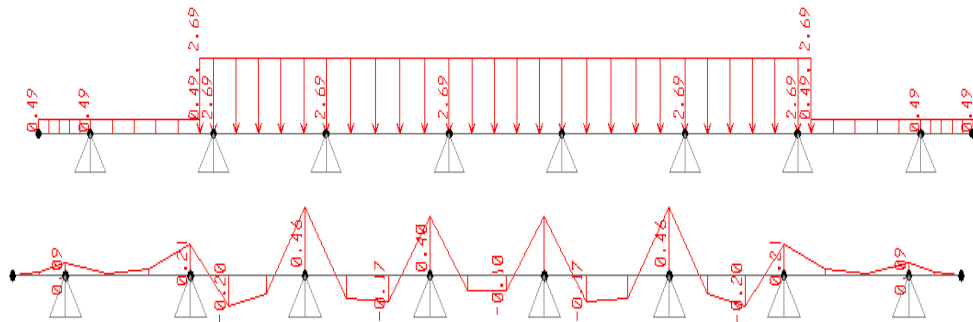
Momen *ultimate* rencana (M_u)

$$Mu_{Tumpuan} = K_{MA} \cdot M_{MATumpuan}$$

$$= 2 \cdot -0,46 \text{ kNm} = -0,92 \text{ kNm}$$

$$Mu_{Lapangan} = K_{MA} \cdot M_{MALapangan}$$

$$= 2 \cdot 0,2 \text{ kNm} = 0,4 \text{ kNm}$$



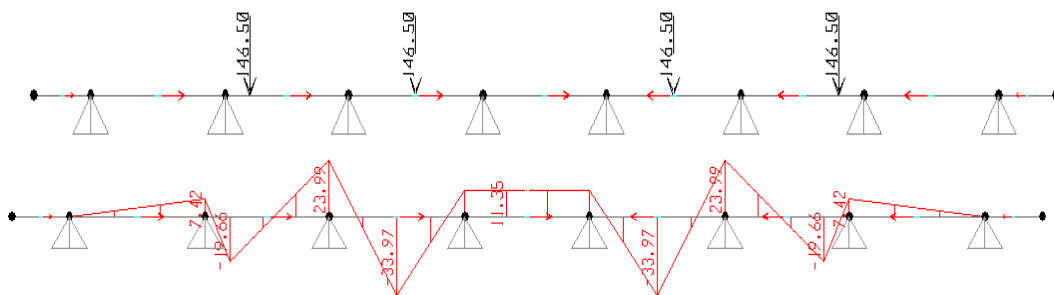
Gambar 6. Momen Maksimal Analisis dengan SAP 2000 v.11 Beban “MA”

3) Beban Hidup Truk “T” (TT)

Beban hidup pada *slab* jembatan berupa roda ganda oleh truk (beban T) yang besarnya beban hidup $T = 112,5$ kN dan faktor beban *ultimate* (K_{TT}) = 1,8. Faktor beban dinamis untuk pembebanan truk diambil DLA (*sumber: RSNIT-02-2005 tentang pembebanan pada jembatan*).

$$\begin{aligned} \text{Beban Truk, PTT} &= (1 + FBD) \cdot T \\ &= (1 + 0,3) \cdot 112,5 = 146,5 \text{ kN.} \end{aligned}$$

Momen tumpuan dan momen lapangan beban hidup truk dari analisis SAP 2000 v.11 disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Momen Maksimal Analisis dengan SAP 2000 v.11 Beban “TT”

$$M_{TT \text{ Tumpuan}} = -24,56 \text{ kNm}$$

$$M_{TT \text{ Lapangan}} = 33,41 \text{ kNm}$$

Momen *ultimate* rencana (M_u)

$$\begin{aligned} M_{u \text{ Tumpuan}} &= K_{TT} \cdot M_{TT \text{ Tumpuan}} \\ &= 1,8 \cdot -23,99 \text{ kNm} \\ &= -43,182 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{u \text{ Lapangan}} &= K_{TT} \cdot M_{TT \text{ Lapangan}} \\ &= 1,8 \cdot 33,97 \text{ kNm} \\ &= 61,146 \text{ kNm} \end{aligned}$$

4) Beban Angin (EW)

Bidang vertikal yang ditiup angin merupakan bidang samping kendaraan dengan tinggi $h = 2,0$ meter di atas lantai jembatan, sedangkan jarak antar roda kendaraan $x = 1,75$ meter, maka transfer

beban angin ke lantai jembatan dapat dihitung dengan cara sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_{EW} &= 0,5 \cdot h/x \cdot T_{EW} \\ &= 0,5 \cdot 2,0/1,75 \cdot 1,269 = 0,8795 \text{ kN} \end{aligned}$$

Momen *ultimate* rencana (M_u)

$$\begin{aligned} M_{u \text{ Tumpuan}} &= K_{EW} \cdot M_{EW \text{ Tumpuan}} \\ &= 1,2 \cdot -0,12 \text{ kNm} \\ &= -0,144 \text{ kNm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{u \text{ Lapangan}} &= K_{EW} \cdot M_{EW \text{ Lapangan}} \\ &= 1,2 \cdot 0,17 \text{ kNm} \\ &= 0,204 \text{ kNm} \end{aligned}$$

Desain Tulangan Plat Lantai

1. Tulangan Pokok

Luas tulangan pokok:

$$As = \rho \cdot b \cdot d = 0,0088 \cdot 1000 \cdot 157 = 1383,4225 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan pokok D16

$$Ad = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2 = 201,062 \text{ mm}^2$$

Jarak tulangan yang diperlukan:

$$s = \frac{Ad \cdot b}{As} = \frac{201,062 \cdot 1000}{1383,4225} = 145,3366 \text{ mm}$$

Jadi dipakai tulangan pokok **D16 – 120**

2. Tulangan Susut

Jumlah tulangan susut/tulangan arah memanjang jembatan dapat diambil 50 % dari tulangan pokok. Ketentuan ini sesuai dengan RSNIT-12-2004 Pasal 5.5.4.c.

$$As' = 50\% \cdot As = 0,5 \cdot 1383,4225 = 691,7112 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan susut D16

$$Ad = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2 = 201,062 \text{ mm}^2$$

Jarak tulangan yang diperlukan:

$$s = \frac{Ad \cdot b}{As} = \frac{201,0619 \cdot 1000}{691,7112} = 290,6732 \text{ mm}$$

Jadi dipakai tulangan susut **D16 – 250**

Pemasangan tulangan pokok melintang slab lantai sedangkan tulangan susut memanjang slab lantai seperti pada Gambar 8.

Perencanaan Plat Injak Jembatan

Momen max pada plat injak akibat beban roda dihitung dengan rumus:

$$\lambda = \left[\frac{Ec \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu) \cdot Ks} \right]^{0,25}$$

$$= \left[\frac{25332084,4 \cdot 0,20^3}{12 \cdot (1 - 0,2) \cdot 81500} \right]^{0,25}$$

$$= 0,6816 \text{ m}$$

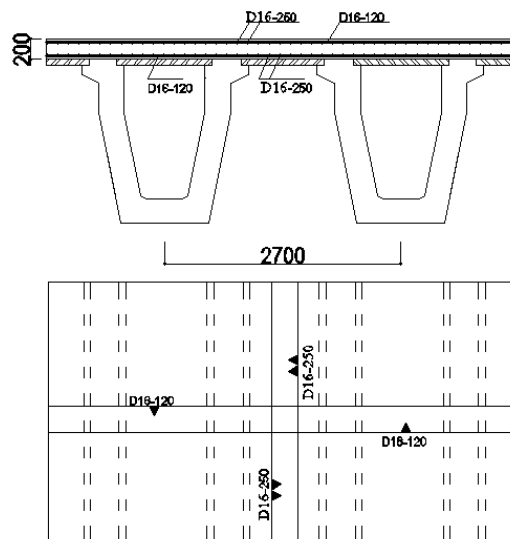
$$Mmax = \frac{T_{TT}}{2} \cdot \left[1 - \left(r \cdot \sqrt{\frac{2}{\lambda}} \right)^{0,6} \right]$$

$$= \frac{146,25}{2} \cdot \left[1 - \left(0,275 \cdot \sqrt{\frac{2}{0,6818}} \right)^{0,6} \right]$$

$$Mmax = 20,9031 \text{ kNm}$$

Momen ultimate plat injak,

$$Mu = K_{TT} \cdot Mmax = 1,8 \cdot 18,1044 \text{ kNm} = 32,5879 \text{ kNm}$$



Gambar 8. Penulangan Slab Lantai Jembatan

1. Penulangan arah melintang jembatan

Luas tulangan pokok:

$$As = \rho \cdot b \cdot d = 0,00438 \cdot 1000 \cdot 157 = 689,1685 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan pokok D16,

$$Ad = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2 = 201,0619 \text{ mm}^2$$

Jarak tulangan yang diperlukan:

$$s = \frac{Ad \cdot b}{As} = \frac{201,0619 \cdot 1000}{689,1685} = 291,7456 \text{ mm}$$

Jadi dipakai tulangan pokok D16 – 250

2. Penulangan arah memanjang jembatan

Luas tulangan pokok:

$$As = \rho \cdot b \cdot d = 0,00745 \cdot 1000 \cdot 157 = 1170,8406 \text{ mm}^2$$

Dipakai tulangan pokok D16,

$$Ad = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2$$

$$= 201,062 \text{ mm}^2$$

Jarak tulangan yang diperlukan:

$$s = \frac{Ad \cdot b}{A_s} = \frac{201,062 \cdot 1000}{1170,8406} = 171,7244 \text{ mm}$$

Jadi dipakai tulangan pokok D16 – 150

Perencanaan Balok Prategang U Girder

Mutu beton balok prategang yang digunakan K-600, setara dengan $f'c = 49,8 \text{ MPa}$. Saat transfer umur beton baru 14 hari sehingga kekuatan beton baru mencapai 80%, maka: $f'ci = 80\% \cdot f'c = 0,80 \cdot 49,8 = 39,84 \text{ MPa}$.

Tegangan ijin beton:

Saat transfer, (Sumber: RSNIT-12-2004 Pasal 4.4.1.2.2 ; Pasal 4.4.1.2.4)

$$\text{Serat tekan: } f_{ci} = 0,60 \cdot f'ci = 0,60 \cdot 39,84 = 23,90 \text{ MPa}$$

$$\text{Serat tarik: } f_{ti} = 0,50 \cdot \sqrt{f'ci} = 3,16 \text{ MPa}$$

Saat layan, (Sumber: RSNIT-12-2004 Pasal 4.4.1.2.1 ; Pasal 4.4.1.2.3)

$$\text{Serat tekan: } f_{cs} = 0,45 \cdot f'c = 0,45 \cdot 49,80 = 22,41 \text{ MPa}$$

$$\text{Serat tarik: } f_{ts} = 0,50 \cdot \sqrt{f'c} = 3,53 \text{ MPa}$$

Total lendutan yang terjadi dari hasil perhitungan adalah δ_T 0,0131 m ke bawah. Lendutan maksimum yang diijinkan:

$$\delta = \frac{L}{240} = \frac{40,8}{240} = 0,17 \text{ m} > \delta_T 0,0131 \text{ m}$$

Desain tulangan lentur

Tulangan arah memanjang digunakan D16

$$\text{Luas } A_{1D} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2 = 201,0619 \text{ mm}^2 = 0,000201 \text{ m}^2$$

1. Bagian Samping

Rasio tulangan susut, $\rho = 0,4\%$

Luas tampang bagian atas,

$$A_{atas} = 0,29 \text{ m}^2 \text{ (ditinjau setiap 1 m)}$$

Luas tulangan bagian atas,

$$A_{s_{atas}} = 0,4\% \cdot A_{atas} = 0,4\% \cdot 0,29 = 0,00116 \text{ m}^2$$

Jarak tulangan

$$s = \frac{A_{1D} \cdot 1000}{A_s} = \frac{0,000201 \cdot 1000}{0,00116} = 173,3292 \text{ mm}$$

Maka dipakai tulangan D16-160

2. Bagian Bawah

Rasio tulangan susut, $\rho = 0,4\%$

Luas tampang bagian tengah,

$$A_{tengah} = 0,275 \text{ m}^2 \text{ (ditinjau setiap 1 m)}$$

Luas tulangan bagian tengah,

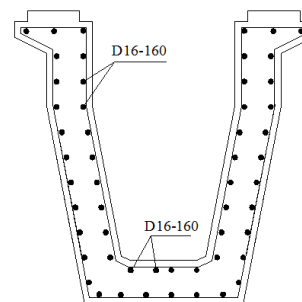
$$A_{s_{tengah}} = 0,4\% \cdot A_{tengah} = 0,4\% \cdot 0,275 = 0,0011 \text{ m}^2$$

Jarak tulangan

$$s = \frac{A_{1D} \cdot 1000}{A_s} = \frac{0,000201 \cdot 1000}{0,0011} = 182,7836 \text{ mm}$$

Maka dipakai tulangan D16-160

Hasil perhitungan tulangan non-prategang dapat dilihat pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Penulangan Lentur Balok Prategang

Desain tulangan geser

Luas tulangan 1D, $A_{1D} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2$
 $A_{1D} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 16^2 = 132,732 \text{ mm}^2 = 0,000133 \text{ m}^2$
 Eksentrisitas tendon,

$$e = 4 \cdot e_s \cdot \frac{X}{L^2} \cdot (L - X)$$

$$e = 4 \cdot 0,6654 \cdot \frac{1,2}{40^2} \cdot (40 - 1) = 0,06488 \text{ m}$$

Sudut kemiringan tendon,

$$\alpha = \text{ATAN} \left[4 \cdot e_s \cdot \left(\frac{L - 2 \cdot X}{L^2} \right) \right]$$

$$= \text{ATAN} \left[4 \cdot 0,6654 \cdot \left(\frac{40 - 2 \cdot 1}{40^2} \right) \right]$$

$$= 0,06313 \text{ rad}$$

Komponen gaya arah x (horizontal),

$$P_x = P_{eff} \cdot \cos \alpha = 13625,84 \cdot \cos 0,06313$$

$$= 13598,69 \text{ kN}$$

Komponen gaya arah y (vertikal),

$$P_y = P_{eff} \cdot \sin \alpha$$

$$= 13625,84 \cdot \sin 0,06313$$

$$= 859,61 \text{ kN}$$

Resultan gaya geser,

$$V_r = V - P_y$$

$$= 1763,25 - 859,61$$

$$= 903,64 \text{ kN}$$

Tegangan geser yang terjadi,

$$f_v = V_r \cdot \frac{S_x}{b \cdot I_x}$$

$$= 903,64 \cdot \frac{0,2860}{1,0,4280}$$

$$= 603,8 \text{ kPa}$$

Tegangan beton di serat atas,

$$f_a = -\frac{P_x}{A} + \frac{P_x \cdot e}{S_a} - \frac{M}{S_a}$$

$$= -\frac{13598,69}{1,2798} + \frac{13598,69 \cdot 0,6654}{0,4431} - \frac{1807,21}{0,4431}$$

$$= -12713 \text{ kPa}$$

Sudut bidang geser,

$$\gamma = \frac{1}{2} \cdot \text{ATAN} \left(\frac{2 \cdot f_v}{f_a} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \text{ATAN} \left(\frac{2 \cdot 603,8}{-12713} \right) = -0,0474 \text{ rad}$$

Jarak sengkang yang diperlukan,

$$s = \frac{f_a \cdot A_{1D}}{f_v \cdot b \cdot \tan \gamma}$$

$$= \frac{-12713 \cdot 0,000133}{603,8 \cdot 1 \cdot \tan(-0,0474)}$$

$$= 0,059 \text{ m} = 59 \text{ mm}$$

Tegangan beton di serat bawah,

$$f_b = -\frac{P_x}{A} + \frac{P_x \cdot e}{S_b} - \frac{M}{S_b}$$

$$= -\frac{13598,69}{1,2798} + \frac{13598,69 \cdot 0,6654}{0,4831} - \frac{1807,21}{0,4841}$$

$$= -12536 \text{ kPa}$$

Sudut bidang geser,

$$\gamma = \frac{1}{2} \cdot \text{ATAN} \left(\frac{2 \cdot f_v}{f_b} \right)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \text{ATAN} \left(\frac{2 \cdot 603,8}{-12536} \right) = -0,048 \text{ rad}$$

Jarak sengkang yang diperlukan,

$$s = \frac{f_b \cdot A_{1D}}{f_v \cdot b \cdot \tan \gamma}$$

$$= \frac{-12536 \cdot 0,000133}{603,8 \cdot 1 \cdot \tan(-0,048)}$$

$$= 0,0573 \text{ m} = 57,3 \text{ mm}$$

Dari perhitungan diatas diperoleh $s = 50 \text{ mm}$ dan $s = 50 \text{ mm}$, maka dipakai jarak sengkang adalah 50 mm . Sehingga tulangan dipakai tulangan sengkang D13-100.

REKAPITULASI HASIL DESAIN

Dinding Pagar Tepi (*Barrier*)

Dinding pagar tepi (*barrier*) merupakan suatu konstruksi pengamanan bagi pengguna jembatan. Mutu beton yang digunakan f'_c 24,9 MPa dan mutu baja f_y 390 MPa. Dari hasil analisis diperoleh dimensi *barrier* yaitu dengan tinggi 1 m dan tebal 0,42 m. Tulangan pokok yang digunakan adalah D13-90. Untuk tulangan susut digunakan tulangan D13-190. Sedangkan untuk tulangan geser digunakan tulangan $\emptyset 6$ -300.

Pelat Lantai Kendaraan

Plat lantai jembatan merupakan struktur yang terletak paling atas pada jembatan. Plat lantai jembatan menerima beban lalu lintas kendaraan yang melintas pada jembatan. Spesifikasi bahan yang digunakan pada plat lantai jembatan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi Bahan dan Desain pada Plat Lantai Jembatan

Desain	Spesifikasi
Lebar, (b)	10,7 meter
Tebal, (h)	0,20 meter
Mutu Beton, (f'_c)	24,9 MPa
Mutu Baja, $\emptyset \geq 13 \text{ mm}$	390 MPa
Mutu Baja, $\emptyset < 13 \text{ mm}$	240 MPa
Tulangan pokok, (arah-X)	D16 – 120
Tulangan susut, (arah-Y)	D16 – 250

Plat Injak Jembatan

Plat injak ditinjau dari arah melintang dan memanjang jembatan. Rekapitulasi hasil desain plat injak jembatan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi Desain Plat Injak

Desain	Spesifikasi
Mutu Beton, ($f'c$)	29,05 MPa
Mutu Baja, $\varnothing \geq 13$ mm (f_y)	390 MPa
Mutu Baja, $\varnothing < 13$ mm (f_y)	240 MPa
Tebal, (h)	0,20 meter
Arah Melintang Jembatan	
Tulangan Pokok	D16 – 250 mm
Arah Memanjang Jembatan	
Tulangan Pokok	D16 – 150 mm

Balok Prategang *U-Girder*

Struktur jembatan direncanakan ulang menggunakan struktur balok prategang paskatarik dengan balok sederhana (*simple beam*) yang menggunakan profil *PCU*

Girder. Spesifikasi desain balok *U-Girder* dapat dilihat pada Tabel 5.

Tegangan yang terjadi pada saat transfer dan layan pada balok *U-Girder* disajikan pada Tabel 6.

Tabel 5. Spesifikasi Desain *PCU-Girder*

Desain	Spesifikasi
Profil Balok	<i>U-Girder</i>
Tinggi Balok	1,85 meter
Mutu Beton, K-600	49,8 MPa
Tipe Strands	ASTM A-416 grade 270
Jumlah tendon	8 tendon
Jumlah <i>strand</i>	152 <i>strands</i>
Jumlah <i>strand</i> tiap tendon	19 tendon
Tipe Angkur	VSL tipe E - 55

Tabel 6. Tegangan Saat Transfer dan Saat Layan yang Terjadi pada Balok *U-Girder*

Tegangan	Hasil	
	Saat transfer	Saat layan
Tegangan izin pada serat atas, (f_{ti})	3,16 MPa	3,53 MPa
Tegangan yang terjadi pada serat atas, (f_{ca})	- 2,6535 MPa	- 4,809 MPa
Tegangan izin pada serat bawah, (f_{tb})	23,904 MPa	22,41 MPa
Tegangan yang terjadi pada serat bawah, (f_{cb})	- 23,9 MPa	- 15,865 MPa

Berdasarkan tegangan-tegangan yang terjadi pada tipe penampang *U-Girder*, hasilnya tidak melebihi tegangan izin yang disyaratkan. Maka hasil dari nilai tegangan yang terjadi pada penampang *U-Girder* dapat dinyatakan aman.

Berdasarkan hasil desain, diperoleh hasil desain struktur atas jembatan dengan *PCU Girder* dan dibandingkan dengan *PCI Girder*. Rekapitulasi perbandingan hasil desain jembatan dengan *PCU Girder* dan *PCI Girder* disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Perbandingan Hasil Desain Jembatan dengan PCU Girder dan PCI Girder

Komponen	Hasil Desain	
	PCU	PCI
Jenis Girder		
Panjang Gider	40;40;40 m	20,4;40;40;20,4 m
Jumlah Girder (1 bentang)	4 buah	5 buah
Jumlah Tendon	32 buah	20 buah
Mutu Beton Girder	K-600	K-500
Tulangan Pokok Girder	D16-160	D16-100
Tinggi Girder	1,85 m	2,1 m
Luas Penampang Girder	1,2798m ²	0,7523 m ²
Jumlah Pilar	2 buah	3 buah
Tulangan Plat Injak	Arah X – D16-250 Arah Y –D16-150	Arah X – D16-150 Arah Y – D25-100
Tulangan Plat Lantai	Pokok – D16-120 Susut – D16-250	Pokok – D16-150 Susut – D16-200
Tulangan <i>Barier</i>	Pokok – D13-90 Susut – D13-190 Geser – D6 -300	Pokok – D13-200 Susut – D13-200 Geser – D10-200

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan yang ditunjukkan sebelumnya, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Struktur atas jembatan PCU Girder didesain menggunakan 4 girder sehingga diperoleh luas total girder sebesar 5,1192 m². Sedangkan untuk struktur PCI Girder didesain dengan menggunakan 5 girder sehingga diperoleh luas total girder sebesar 3,7615 m². Oleh karena itu, PCU Girder lebih berat dan lebih mahal dibandingkan PCI Girder.
2. Jumlah tendon yang dibutuhkan PCU Girder lebih banyak yaitu 32 buah sedangkan PCI Girder hanya 20 buah dengan jenis yang sama yaitu ASTM A-416 grade 270.
3. Jumlah tulangan pokok dan geser yang dibutuhkan oleh tipe jembatan dengan PCU Girder lebih banyak dibandingkan dengan PCI Girder, sehingga lebih mahal.

DAFTAR PUSTAKA

- Aboe, A. Kadir., (2006), *Beton Prategang*. Yogyakarta: Andi Offset.
- Annur, D.F., dan Tarigan, J., (2013). Perencanaan Precast Concrete I Girder pada Jembatan Prestressed Post-tension dengan Bantuan Program Microsoft Office Excel, *Jurnal Teknik Sipil USU*, Vol 2, No 2 (2013), ISSN: 2303-0127.
- BAKOSURTANAL, (2005), Pengertian, Fungsi dan Jenis Peta. (Online), (<http://farid-rizky.blogspot.co.id/2012/12/pengertian-fungsi-dan-jenis-peta.html>, Diakses 20 Desember 2015)
- Direktorat Jenderal Bina Marga, (2004), *Peraturan Perencanaan Struktur Beton Untuk Jembatan RSNIT-12-2004*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Direktorat Jenderal Bina Marga, (2005), *Standar Pembebanan untuk Jembatan RSNIT-02-2005*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta
- Direktorat Jenderal Bina Marga, (2008), *Standar Perencanaan Gempa untuk Jembatan SNI 2833:2008*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Febrianto, Andri, (2015), *Perencanaan Fly over Jombor Menggunakan Struktur Beton Prategang Jenis PCI Girder*

- (*Prestressed Concrete I Girder*). Perencanaan, tidak dipublikasikan. Yogyakarta :Universitas Islam Indonesia.
- Lin T.Y., Burns Ned H., (2000), *Disain Struktur Beton Prategang jilid 1 dan 2* terjemahan Mediana Sianipar. Interaksara.
- Masnul, C.R., (2009), *Analisa Prestress (Post-Tension) pada Precast Concrete U Girder “Studi Kasus Pada Jembatan Flyover Amplas”*.Perencanaan,tidak dipublikasikan. Sumatra Utara: Universitas Sumatra Utara
- Supriyadi, B., dan Muntohar, A.S., (2007), *Jembatan*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Taylor, Dena dan Margaret Procter. (2010), *“The Literature Review: A Few Tips on Conducting It”*. Toronto: University Toronto Writing Center.