

PERBANDINGAN DESAIN STRUKTUR BETON PRATEGANG ANTARA BALOK SEDERHANA DENGAN BALOK MENERUS PADA STRUKTUR ATAS JEMBATAN SAMBIROTO DENGAN MENGGUNAKAN *PCI-GIRDER*

Anggit Wicaksono¹, Sarwidi², dan Suharyatma³

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

Email : 13511216@students.uii.ac.id

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

Email : sarwidi@uui.ac.id

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

Email : 865110201@staf.uui.ac.id

Abstract: *Bridge is a construction that aims to connect two sections of road that disconnected by obstacle below it. These obstacles can be rivers, ravines, seas and other roads. The bridge serves as a pedestrian, motor vehicles and trains crossing medium. One of the structural elements of the bridge is girder. There are various kinds of girder used on the bridge for example, conventional concrete girder, and prestressed concrete girders. Conventional concrete girder is a concrete beam that uses tensile reinforcement and press reinforcement. Prestressed concrete girder is a concrete beam that is given a prestressing force on the part that receives the tensile force, so the tensile stress on the concrete will reduced. Sambiroto Bridge is located in Sendangsari Hamlet, Pengasih District, Kulon Progo Regency. This research uses Sambiroto Bridge as a case study. The bridge has a total span of 60 m, using a PCI girder. The bridge is designed using a simple beam structure consisting of 2 spans, each span is 30 m. In this research will be compared the structure of Sambiroto Bridge by using simple beam structure and continuous beam structure. Both designs use 30 m spans with the same material and cross-sectional specifications. The girder used is prestressed girder with cross section of "I" with a height of 1.7 m of K-500 concrete from PT. Wika Beton. The regulations used in this research are The Bridges Load Standard (SNI-1725-2016), Concrete Structural Design for Bridges (RSNIT-12-2004) and Earthquake Design Standards for Bridges (SNI 2833-1008). Analysis of the bridge structure using SAP2000 V.11 and Microsoft Excel 2013. The result is that using PCI-Girder on a 30 m span bridge, the continuous beam design is more efficient than simple beam in the use of strand material, but more extravagant in the use of shear reinforcement. Simple beam uses 56 pieces of strands and 1060 shear reinforcement while continuous beam uses 52 pieces of strands and 1160 shear reinforcement.*

Keywords: *Prestressed Concrete, Bridge, PCI-Girder, Simple Beam, Continuous Beam*

1. PENDAHULUAN

Menurut Struyk dan Veen (1984), jembatan adalah suatu konstruksi yang berfungsi untuk meneruskan jalan melalui suatu rintangan yang berada di bawahnya. Rintangan tersebut dapat berupa sungai, jurang, laut maupun

jalan lain. Jembatan merupakan sarana transportasi yang menunjang kegiatan lali lintas dan meningkatkan aktivitas perekonomian. Jembatan berfungsi sebagai media penyeberangan pejalan kaki, kendaraan bermotor maupun kereta api.

Salah satu elemen struktur atas jembatan adalah gelagar. Terdapat berbagai macam gelagar yang digunakan pada jembatan diantaranya, gelagar beton konvensional, dan gelagar beton prategang. Gelagar beton konvensional adalah balok beton yang menggunakan tulangan tarik dan tekan. Gelagar beton prategang adalah balok beton yang diberi gaya prategang pada bagian yang menerima gaya tarik, sehingga tegangan tarik pada beton akan berkurang. Akibatnya gelagar beton prategang dapat menahan gaya lentur yang lebih besar dibanding gelagar beton konvensional dengan dimensi yang sama.

Menurut Lin dan Burns (2000b), struktur prategang dengan menggunakan balok menerus lebih hemat dari pada menggunakan balok sederhana dimana dua kali beban yang dapat dipikul balok sederhana dapat dipikul oleh balok menerus dengan jumlah beton dan baja yang sama.

Penelitian ini menggunakan Jembatan Sambiroto sebagai studi kasus. Jembatan tersebut terletak di Dusun Sendangsari, Kecamatan Pengasih, Kabupaten Kulon Progo. Jembatan tersebut memiliki bentang total 60 m, menggunakan gelagar *PCI* dengan tinggi gelagar 1,7 m. Jembatan tersebut didesain menggunakan struktur balok sederhana yang terdiri dari 2 bentang, masing-masing sepanjang 30 m. Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan desain struktur atas jembatan dengan balok prategang menggunakan balok sederhana dan balok menerus, dimana panjang bentang dan jumlah bentang jembatan yang didesain disamakan dengan jembatan eksisting. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perbandingan material yang digunakan dalam desain balok sederhana dan balok menerus.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Terdapat 3 penelitian terdahulu yang digunakan sebagai tinjauan pustaka dalam penelitian ini. Rangkuman penelitian tersebut adalah sebagai berikut.

2.1. Darwis (2016)

Darwis (2016) melakukan desain ulang Jembatan Nambangan dengan menggunakan struktur beton prategang. Hasil perencanaan

jembatan meliputi gelagar berpenampang “I” (*I-Girder*) dengan tebal *slab* 0,3 m dan tinggi penampang *I-Girder* 1,9 m. Baja Prategang menggunakan *strands* 7 kawat dengan jumlah tendon sebanyak 4 buah untuk tiap gelagar.

2.2. Putra (2016a)

Putra (2016a) mendesain ulang Jembatan Jurang Gempal dengan menggunakan gelagar prategang profil “U”. Hasil perencanaan meliputi gelagar *PC U* dengan tinggi 1,85 m, menggunakan 3 bentang dengan panjang tiap bentang 40 m dan lebar melintang 10,7 m.

2.3. Putra (2016b)

Putra (2016b) melakukan penelitian untuk membandingkan efisiensi dalam hal penggunaan material terhadap 2 penampang balok prategang yaitu *Box-Girder* dan *PCI-Girder*. Jembatan yang digunakan untuk penelitian memiliki Panjang bentang 40 m. Kesimpulan dari hasil tersebut adalah *Prestressed Concrete I-Girder* lebih efektif digunakan untuk bentang 40 m pada perencanaan ulang struktur atas Jembatan Jurang Gempal.

3. LANDASAN TEORI

3.1. Beton Prategang

Menurut Nawy (2001), beton adalah material yang kuat dalam kondisi tekan, tetapi lemah terhadap tarik: kuat tariknya bervariasi dari 8 sampai 14 persen dari kuat tekannya. Karena rendahnya kapasitas tarik tersebut, maka letak lentur terjadi pada taraf pembebanan yang masih rendah. Untuk mengurangi atau mencegah berkembangnya retak tersebut, gaya prategang diberikan dalam arah longitudinal elemen struktural. Gaya ini mencegah berkembangnya retak dengan cara mengeliminasi atau sangat mengurangi tegangan tarik di bagian tumpuan dan daerah kritis pada kondisi beban kerja, sehingga dapat meningkatkan kapasitas lentur geser dan torsional penampang tersebut. Penampang dapat berperilaku elastis, dan hampir semua kapasitas beton dalam memikul tekan dapat secara efektif dimanfaatkan di seluruh tinggi penampang beton pada saat semua beban bekerja di struktur tersebut.

3.1.1. Prinsip-Prinsip Dasar Beton Prategang

Menurut Lin dan Burns (2000a), ada tiga konsep yang dapat dipakai untuk menjelaskan dan menganalisis sifat-sifat dasar dari beton prategang. Ketiga konsep tersebut adalah untuk mengubah beton menjadi bahan yang elastis, kombinasi baja mutu tinggi, dan untuk mencapai kesetimbangan beban.

3.1.2. Tahap Pembebanan

Supriadi dan Muntohar (2000) menyatakan bahwa dalam perancangan beton prategang, pembebanan tidak hanya ditinjau berdasarkan beban eksternal yang bekerja seperti beban mati dan beban hidup, tetapi juga terhadap kombinasi dari beban-beban tersebut dengan gaya prategang yang bekerja pada penampang beton. Tahapan tersebut adalah sebagai berikut.

1. Initial Stage

Initial stage adalah tahap dimana gaya prategang dipindahkan pada beton dan tidak ada beban luar yang bekerja selain berat sendiri. Pada tahap ini gaya prategang maksimum sebab belum ada kehilangan prategang dan kekuatan beton minimum sebab umur beton masih muda, konsekuensinya tegangan pada beton menjadi kritis.

2. Final Stage

Tahap ini adalah pembebanan yang paling berat untuk kondisi masa pelayanan, dengan asumsi bahwa semua kehilangan prategang telah terjadi sehingga gaya prategang telah mencapai nilai terkecil dan kombinasi beban luar telah mencapai nilai terbesar yaitu meliputi berat sendiri, beban mati, beban hidup, beban kejut dan sejenisnya.

3.2. Pembebanan

Peraturan pembebanan yang digunakan dalam desain Jembatan Sambiroto adalah Peraturan Standar Pembebanan Untuk Jembatan SNI-1725-2016 dan Standar Perencanaan Gempa Untuk Jembatan SNI 2833-2008.

3.3. Perencanaan Struktur Atas

Perencanaan struktur atas menggunakan teori persamaan tegangan dan kehilangan gaya

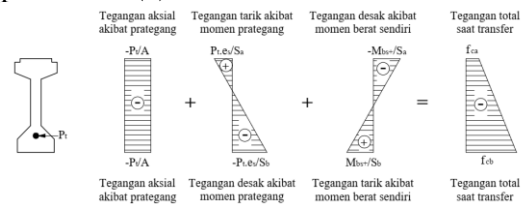
prategang seperti yang dijelaskan pada poin-poin berikut.

3.3.1. Tegangan

Tegangan yang terjadi pada balok prategang secara umum terdiri dari 2 kondisi yaitu kondisi awal dan kondisi akhir dengan penjelasan sebagai berikut.

1. Kondisi Awal (Saat Transfer)

Tegangan yang terjadi pada kondisi awal adalah kondisi pada saat penarikan tendon prategang dimana beban yang bekerja adalah baban sendiri balok seperti yang ditampilkan pada Gambar 1 dan persamaan (1).

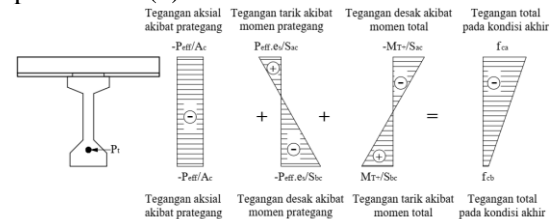


Gambar 1 Diagram tegangan beton pada kondisi awal

$$f = -\frac{P_t}{A} \pm \frac{P_t \times e_s}{S_a} \pm \frac{M_{balok}}{S_a} \quad (1)$$

2. Kondisi Akhir

Tegangan yang terjadi pada kondisi akhir adalah kondisi pada saat semua gaya sudah bekerja seperti yang terlihat pada yang ditampilkan pada Gambar 2 dan persamaan (2).



Gambar 2 Diagram tegangan beton pada kondisi akhir

$$f_t = -\frac{P_e}{A} \pm \frac{P_e \times e_s}{S_a} \pm \frac{M_T}{S_a} \quad (2)$$

3.3.2. Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang dibedakan menjadi 2, yaitu kehilangan gaya prategang jangka pendek dan kehilangan gaya prategang jangka panjang.

1. Kehilangan Gaya Prategang Jangka Pendek

Kehilangan gaya prategang jangka pendek terjadi pada saat proses transfer gaya

prategang, dan terjadi pada waktu singkat. Terdapat 3 jenis kehilangan prategang jangka pendek yang dapat dilihat pada poin-poin berikut.

- Kehilangan akibat perpendekan elastis beton dihitung dengan persamaan (3).

$$\Delta f_{pES} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta f_{pES})_j \quad (3)$$

- Kehilangan karena dudukan anker dihitung dengan persamaan (4).

$$\Delta f_{pA} = \frac{\Delta A}{L} E_{ps} \quad (4)$$

- Kehilangan akibat friksi / gesekan dihitung dengan persamaan (5).

$$\Delta f_{pF} = f_1 (1 - e^{-\mu \alpha - KL}) \quad (5)$$

2. Kehilangan Gaya Prategang Jangka Panjang

Terdapat 3 jenis kehilangan prategang jangka panjang yang dapat dilihat pada poin-poin berikut.

- Kehilangan akibat relaksasi tegangan baja dihitung dengan persamaan (6).

$$\Delta f_{pR} = f_{ps} \cdot \frac{\log t}{45} \cdot \left(\frac{f_{ps}}{f_{py}} - 0.55 \right) \quad (6)$$

- Kehilangan akibat rangkaiak dihitung dengan persamaan (7).

$$\Delta f_{pCR} = n \cdot K_{CR} \cdot (f_{cs} - f_{csd}) \quad (7)$$

- Kehilangan yang disebabkan oleh susut dihitung dengan persamaan (8).

$$\Delta f_{pSH} = (\epsilon_{SH})_t \cdot E_s \quad (8)$$

3.3.3. Kekuatan Batas Lentur

Kekuatan batas lentur *PCI-Girder* adalah kapasitas maksimum *PCI-Girder* dalam menahan momen yang terjadi akibat beban. Tegangan tulangan prategang saat M_n dicapai dihitung dengan persamaan (9).

$$f_{ps} = f_{pu} \left[1 - \frac{\gamma_p \rho_p f_{pu}}{\beta_1 f_c'} \right] \quad (9)$$

Momen nominal dihitung dengan persamaan (10).

$$M_n = T_s \cdot (d - a/2) \quad (10)$$

4. METODE PENELITIAN

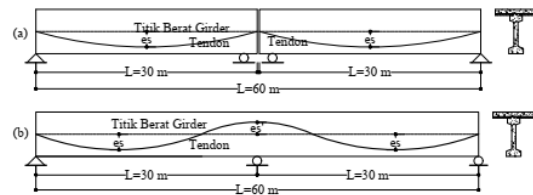
Tugas akhir ini menggunakan Jembatan Sambiroto sebagai studi kasus. Jembatan tersebut terletak di Dusun Sendangsari, Kecamatan Pengasih, Kabupaten Kulon Progo. Jembatan tersebut memiliki bentang total 60 m, terdiri dari 2 bentang dengan masing-masing bentang 30 m.

Jembatan tersebut akan di desain ulang menggunakan dua jenis struktur yaitu struktur balok sederhana dan menerus. Sistem prategang menggunakan sistem pasca tarik dengan tendon terekat dan merupakan struktur beton prategang penuh pada kedua desain. Jumlah bentang dan panjang bentang disamakan dengan jembatan eksisting.

Gelagar yang digunakan adalah gelagar prategang dengan penampang "I" dengan tinggi 1,7 m K-500 dari PT. Wijaya Karya Beton. Gelagar tersebut digunakan untuk kedua desain yaitu desain balok sederhana dan balok menerus. Baja prategang yang digunakan adalah ASTM A-16 *grade* 270 dengan tegangan leleh 1675 MPa, tegangan ultimit 1860 MPa, dan diameter *strand* 12,7 mm (VSL, 2018).

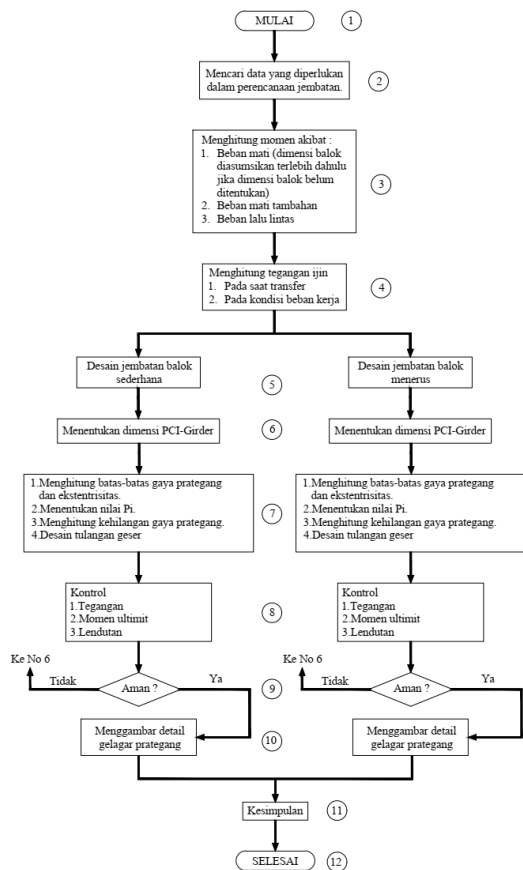
Peraturan yang digunakan dalam penelitian ini adalah SNI-1725-2016 (2016), RSNIT-02-2005 (2005), RSNIT-12-2004 (2004), dan SNI-2833-2008 (2008).

Perbandingan dilakukan terhadap jumlah *strand* dan tulangan geser yang digunakan. Sketsa penampang memanjang gelagar prategang dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Sketsa penampang memanjang jembatan (a) struktur balok sederhana, (b) struktur balok menerus

Bagan alir metode penelitian yang digunakan dalam tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Flow chart pengerjaan tugas akhir

5. DATA ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Analisis dalam penelitian ini meliputi perhitungan penampang *PCI-Girder*, pembebanan balok prategang, perhitungan struktur balok menerus dan balok sederhana.

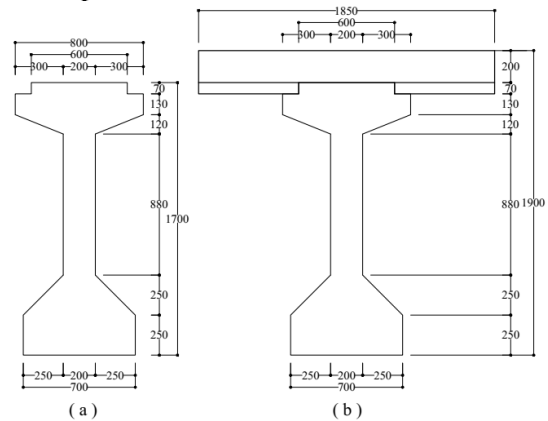
5.1. Penampang *PCI-Girder*

Section Properties PCI-Girder yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 *Section properties PCI-Girder* non-komposit dan *PCI-Girder* komposit

Tinjauan		Non-Komposit	Komposit	Sat
Luas penampang balok	A	0,6695	0,9323	m ²
Titik berat balok	ya	0,8834	0,8062	m
	yb	0,8166	1,0938	m
Momen inersia	Ix	0,2364	0,4198	m ⁴
	Sa	-	0,5207	m ³
Modulus penampang	Sa'	0,2676	0,6924	m ³
	Sb	0,2895	0,3838	m ³

Penampang melintang *PCI-Girder* dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Penampang melintang (a) *PCI-Girder* non-komposit dan (b) *PCI-Girder* komposit

5.2. Pembebanan Balok Prategang

Pembebanan yang digunakan dalam perencanaan balok prategang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Pembebanan balok prategang

No.	Jenis Beban	Kode beban	Q (kN/m)	P (kN)	M (kNm)
1	Berat balok prategang	balok	17,07	-	-
2	Berat pelat	pelat	9,25	-	-
3	Beton cor di tempat	cor	12,76	-	-
4	Berat sendiri	MS	29,83	-	-
5	Mati tambahan	MA	2,94	-	-
6	Lajur "D"	TD	16,65	126,91	-
7	Gaya rem	TB	-	11,25	-
8	Angin kendaraan	EW	5,00	-	-
9	Temperatur seragam	EUn	0,75	-	-
10	Gempa	EQ	1,05	-	117,56

5.3. Perhitungan Gelagar Prategang Balok Sederhana

Perhitungan gelagar struktur balok sederhana meliputi tahap-tahap perhitungan dan kontrol untuk memastikan gelagar aman terhadap beban yang bekerja sebagaimana yang dijabarkan dalam poin-poin berikut.

5.3.1. Momen dan Gaya Geser Balok Sederhana

Momen dan gaya geser maksimum yang terjadi pada balok sederhana dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Momen maksimum tiap beban pada balok sederhana

Beban		Momen (kNm)	Gaya Geser (kN)	Satuan
Beban balok	<i>M_{bs}</i>	1920,63	256,09	kNm
Beban pelat	<i>M_{pelat}</i>	1040,63	138,75	kNm
Beton cor di tempat	<i>M_{cor}</i>	1435,22	191,36	kNm
Berat sendiri	<i>M_S</i>	3355,85	447,45	kNm
Beban mati tambahan	<i>M_A</i>	330,92	44,12	kNm
Beban lajur "D"	<i>T_D</i>	2824,95	372,43	kNm
Beban rem	<i>T_B</i>	84,38	10,88	kNm
Beban angin	<i>E_{WL}</i>	84,47	11,26	kNm
Temperatur seragam	<i>E_{Un}</i>	117,56	15,68	kNm
Beban gempa	<i>E_Q</i>	528,4057	70,45	kNm

5.3.2. Perhitungan Gaya Prategang

Eksentrisitas tendon yang digunakan dalam desain struktur balok sederhana adalah sebagai berikut.

$$e_s = 0,6666 \text{ m}$$

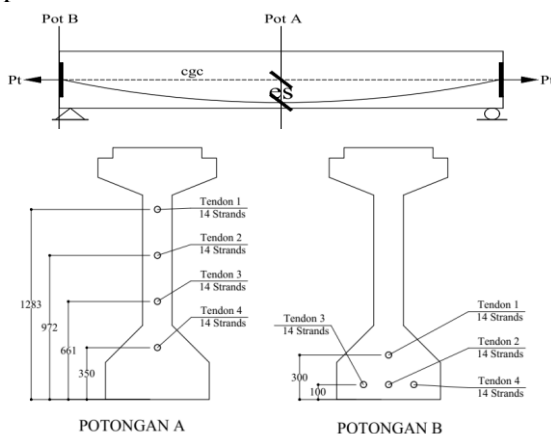
Gaya prategang awal dihitung dengan persamaan (1) dengan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$P_t = 6995,02 \text{ kN}$$

Gaya prategang tersebut menggunakan 4 buah tendon dengan masing-masing tendon terdiri dari 14 *strand*, sehingga total *strand* yang dipakai adalah 56 buah. Luas penampang 1 *strand* adalah 98,7 mm², sehingga luas baja prategang adalah sebagai berikut.

$$A_p = n_s \cdot A_{st} = 56 \cdot 98,7 = 5527,76 \text{ mm}^2$$

Tendon ditempatkan pada *PCI-Girder* seperti pada Gambar 6.



Gambar 6 Penampang melintang *PCI-Girder* dengan detail penempatan tendon

5.3.3. Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang pada struktur balok sederhana dihitung dengan persamaan (3) sampai (6) dengan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4 Kehilangan gaya prategang pada struktur balok sederhana

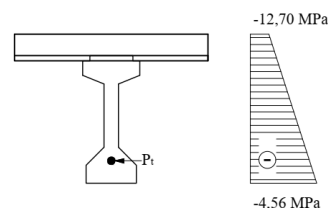
No	Level Tegangan	Tegangan Baja	Persentase
		(MPa)	(%)
	Setelah Penegangan	1488,7465	100%
1	Pergeseran ankur	12,8667	0,86%
2	Gesekan kabel	135,6673	9,11%
3	Perpendekan elastis beton	59,2064	3,98%
	<i>f_{ps}</i> =	1281,0062	86,05%
4	Rangkak beton	152,0063	10,21%
5	Susut beton	73,0431	4,91%
6	Relaksasi tendon	34,4925	2,32%
	Tegangan Akhir (<i>f_{eff}</i>)	1021,4643	68,61%
	Kehilangan Tegangan Total	467,2822	31,39%

Gaya prategang efektif adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_{eff} &= A_{ps} \cdot f_{eff} \\ &= 5527,76 \cdot 1021,4643 \cdot 10^{-3} \\ &= 5646,4069 \text{ kN} \end{aligned}$$

5.3.4. Tegangan Akibat Kombinasi Pembebanan

Kontrol tegangan dilakukan untuk memastikan beton tidak retak akibat tegangan desak atau tarik yang terjadi pada penampang balok. Tegangan beton dihitung dengan persamaan (2), dengan beban sesuai kombinasi pembebanan yang ada pada SNI-1725-2016. Berdasarkan kombinasi tersebut, tegangan terbesar terjadi pada kombinasi "Ekstrim I" dengan diagram tegangan ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7 Diagram tegangan balok sederhana kombinasi "Ekstrim I" di tengah bentang

5.3.5. Kekuatan Batas Lentur

Gaya tarik baja prategang saat M_n dicapai dihitung dengan persamaan (9) dengan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$T_s = 7592,3784 \text{ kN}$$

Momen nominal *PCI-Girder* dihitung dengan persamaan (10), dengan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$M_n = 12664,7647 \text{ kNm}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,8 \cdot 12664,76 = 10131,81 \text{ kNm}$$

5.3.6. Kontrol Momen Ultimit

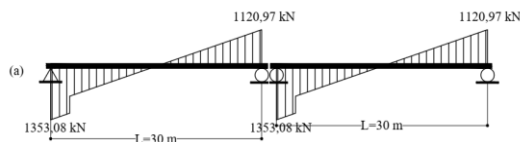
Momen ultimit akibat kombinasi pembebanan berdasarkan SNI-1725-2016 dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 5 Momen ultimit akibat kombinasi pembebanan

Kombinasi Beban	Balok Sederhana		
	M_u	ϕM_n	Ket
Kuat I	5862,522	10131,81	AMAN
Kuat II	4698,792	10131,81	AMAN
Kuat III	625,737	10131,81	AMAN
Kuat IV	625,737	10131,81	AMAN
Kuat V	710,209	10131,81	AMAN
Ekstrem I	1885,866	10131,81	AMAN
Ekstrem II	1939,325	10131,81	AMAN
Layan I	3455,140	10131,81	AMAN
Layan II	4243,466	10131,81	AMAN
Layan III	2788,803	10131,81	AMAN
Layan IV	461,343	10131,81	AMAN
Fatik	2181,994	10131,81	AMAN

5.3.7. Tulangan Geser

Kombinasi pembebanan yang menghasilkan gaya geser terbesar adalah kombinasi "Kuat 1" seperti yang ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8 Diagram gaya geser kombinasi "Kuat 1" pada balok sederhana

Tulangan geser yang digunakan dalam desain balok sederhana dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 6 Tulangan geser desain balok sederhana

No.	Bentang (m)	Tulangan Geser	Jumlah Tulangan Geser
1	0 - 4	2-D13-150	27
2	4 - 8	2-D13-300	14
3	8 - 15	2-D13-600	12
Jumlah (n)			53

Jumlah tersebut merupakan jumlah tulangan untuk setengah bentang gelagar, sehingga tulangan geser keseluruhan untuk jembatan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} n_t &= n \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \\ &= 53 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \\ &= 1060 \text{ tulangan geser} \end{aligned}$$

5.4. Perhitungan Gelagar Prategang Balok Menerus

Perhitungan gelagar struktur balok sederhana meliputi tahap-tahap perhitungan dan kontrol untuk memastikan gelagar aman terhadap beban yang bekerja sebagaimana yang dijabarkan dalam poin-poin berikut.

5.4.1. Momen dan Gaya Geser Balok Menerus

Momen dan gaya geser maksimum yang terjadi pada balok menerus dianalisis dengan menggunakan program SAP2000 v.14 dengan hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 7 Momen maksimum tiap beban pada balok menerus

Beban		Momen+ (kNm)	Momen- (kNm)	G Geser (kN)	Sat
Beban balok	Mbs	1079,85	-1920,57	-320,10	kNm
Beban pelat	Mpelat	585,08	-1040,59	-173,44	kNm
Beton cor ditempat	Mcor	806,93	-1435,17	-239,20	kNm
Berat sendiri	MS	1886,78	-3355,75	-559,31	kNm
Beban mati tambahan	MA	186,05	-330,91	-55,15	kNm
Beban lajur "D"	TD	1320,22	-2595,09	-438,89	kNm
Beban rem	TB	37,84	-64,00	-11,23	kNm
Beban angin	EWL	47,50	-84,47	-14,08	kNm
Temperatur seragam	EUn	66,10	-117,56	-19,59	kNm
Beban gempa	EQ	297,09	-528,38	-88,07	kNm

5.4.2. Perhitungan Gaya Prategang

Eksentrisitas tendon yang digunakan dalam desain struktur balok menerus adalah $e_s = 0,4666 \text{ m}$ untuk tendon daerah lapangan dan $e_s' = 0,7334 \text{ m}$ untuk tendon daerah tumpuan.

Gaya prategang awal dihitung dengan persamaan (1) dengan hasil perhitungan sebagai berikut.

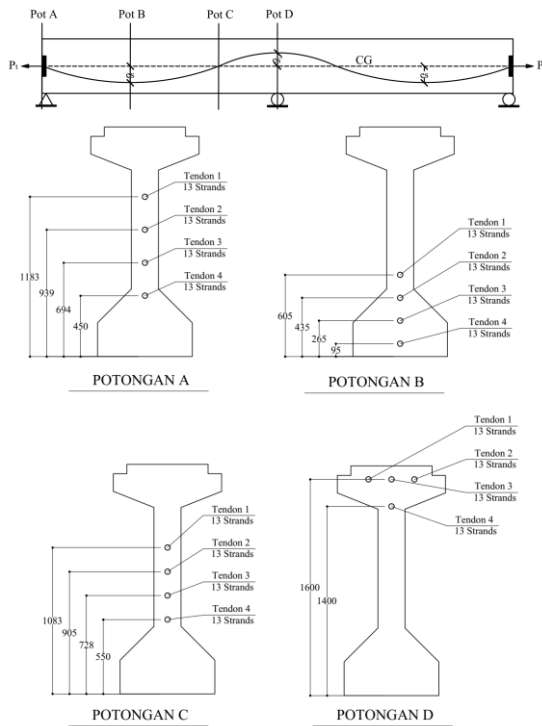
$$\text{Gaya prategang awal, } P_t = 6399,46 \text{ kN}$$

Gaya prategang tersebut menggunakan 4 buah tendon dengan masing-masing tendon terdiri

dari 12 *strand*, sehingga total *strand* yang dipakai adalah 52 buah. Luas penampang 1 *strand* adalah 98,7 mm², sehingga luas baja prategang adalah sebagai berikut.

$$A_p = n_s \cdot A_{st} = 52 \cdot 98,7 = 5132,92 \text{ mm}^2$$

Tendon ditempatkan pada *PCI-Girder* seperti pada Gambar 9.



Gambar 9 Penampang melintang *PCI-Girder* dengan detail penempatan tendon

5.4.3. Kehilangan Gaya Prategang

Kehilangan gaya prategang yang terjadi pada balok menerus dihitung dengan persamaan (3) sampai (6) dengan hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 8 Kehilangan gaya prategang pada struktur balok menerus

No	Level Tegangan	Tegangan Baja	Persentase
		(MPa)	(%)
	Setelah Penegangan	1466,7637	100%
1	Pergeseran ankur	12,8667	0,88%
2	Gesekan kabel	231,0504	15,75%
3	Perpendekan elastis beton	42,9286	2,93%
	<i>fps</i> =	1179,9180	80,44%
4	Rangkak beton (<i>creep</i>)	94,7027	6,46%
5	Susut beton (<i>shrinkage</i>)	73,0431	4,98%
6	Relaksasi tendon	22,8433	1,56%

Tabel 8 Lanjutan

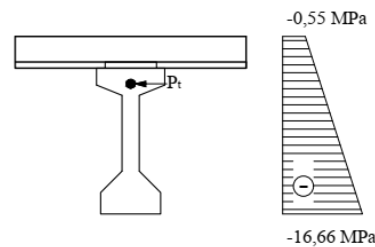
No	Level Tegangan	Tegangan Baja	Persentase
		(MPa)	(%)
	Tegangan Akhir (<i>fpe</i>)	989,3289	67,45%
	Kehilangan Tegangan Total	477,4348	32,55%

Gaya prategang efektif adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} P_{eff} &= A_{ps} \cdot f_{eff} \\ &= 5132,92 \cdot 989,3289 \cdot 10^{-3} \\ &= 5078,1461 \text{ kN} \end{aligned}$$

5.4.4. Tegangan Akibat Kombinasi Pembebanan

Kontrol tegangan dilakukan untuk memastikan beton tidak retak akibat tegangan desak atau tarik yang terjadi pada penampang balok. Tegangan beton dihitung dengan persamaan (2), dengan beban sesuai kombinasi pembebanan yang ada pada SNI-1725-2016. Berdasarkan kombinasi tersebut, tegangan terbesar terjadi pada kombinasi “Ekstrim I” dengan diagram tegangan ditampilkan pada Gambar 10.



Gambar 10 Diagram tegangan balok menerus kombinasi “Ekstrim I” di tumpuan tengah

5.4.5. Kekuatan Batas Lentur

Gaya tarik baja prategang saat M_n dicapai dihitung dengan persamaan (9), dengan hasil perhitungan sebagai berikut.

$$T_s = 7050065,62 \text{ N}$$

Momen nominal ultimit dihitung dengan persamaan (10) dengan hasil perhitungan adalah sebagai berikut.

Momen nominal ultimit untuk menahan momen positif

$$M_n = 10391,37 \text{ kNm}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,8 \cdot 10391,37 = 8313,1 \text{ kNm}$$

Momen nominal ultimit untuk menahan momen negatif

$$M_n = 9919,85 \text{ kNm}$$

$$\phi \cdot M_n = 0,8 \cdot 9919,85 = 7935,88 \text{ kNm}$$

5.4.6. Kontrol Momen Ultimit

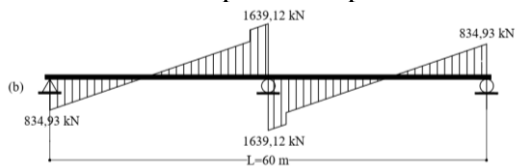
Momen ultimit akibat kombinasi pembebanan berdasarkan SNI-1725-2016 dapat dilihat pada Tabel 11.

Tabel 9 Kontrol momen ultimit pada struktur balok menerus

Kombinasi Beban	Lapangan		Tumpuan	
	Mu	Ket	Mu	Ket
Kuat I	2299,98	AMAN	7399,46	AMAN
Kuat II	1756,75	AMAN	6335,83	AMAN
Kuat III	-144,53	AMAN	2613,10	AMAN
Kuat IV	-144,53	AMAN	2613,10	AMAN
Kuat V	-97,04	AMAN	2697,57	AMAN
Ekstrem I	480,65	AMAN	3798,14	AMAN
Ekstrem II	455,18	AMAN	3801,57	AMAN
Layan I	1453,13	AMAN	4167,67	AMAN
Layan II	1813,05	AMAN	4880,93	AMAN
Layan III	1134,02	AMAN	3551,38	AMAN
Layan IV	47,57	AMAN	1424,11	AMAN
Fatik	1018,55	AMAN	1994,32	AMAN

5.4.7. Tulangan Geser

Kombinasi pembebanan yang menghasilkan gaya geser terbesar adalah kombinasi “Kuat I” seperti yang ditampilkan pada Gambar 11. Tulangan geser yang digunakan dalam desain balok sederhana dapat dilihat pada Tabel 12.



Gambar 11 Diagram gaya geser kombinasi “Kuat 1” pada balok menerus

Tabel 10 Tulangan geser pada desain balok menerus

No.	Bentang	Tulangan Geser	Jumlah Tulangan Geser
1	0 - 4	2-D13-150	34
2	4 - 18	2-D13-300	14
3	18-21	2-D13-600	10
Jumlah			58

Jumlah tersebut merupakan jumlah tulangan untuk ½ bentang gelagar, sehingga tulangan geser keseluruhan untuk jembatan adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 n_t &= n \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \\
 &= (58) \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \\
 &= 1160 \text{ tulangan geser}
 \end{aligned}$$

6. KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan dan perbandingan desain balok sederhana dan balok menerus dengan menggunakan penampang *PCI-Girder*, simpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut.

1. Kombinasi pembebanan yang menghasilkan momen dan gaya geser terbesar adalah kombinasi “Kuat 1”. Hasil perhitungan momen dan gaya geser kombinasi “Kuat 1” dijabarkan pada poin-poin berikut.

a. Momen

Struktur balok sederhana menghasilkan momen positif sebesar 10210,24 kN, sedangkan struktur balok menerus menghasilkan momen positif di daerah lapangan sebesar 5201,54 kN dan momen negatif di tumpuan tengah sebesar 9759,67 kN. Balok menerus mereduksi momen positif dibandingkan dengan momen positif pada balok sederhana, dan memiliki momen negatif yang juga lebih kecil dibanding momen positif pada balok sederhana.

b. Gaya Geser

Gaya geser maksimum pada desain balok sederhana memiliki nilai 1353,08 kN, sedangkan pada desain balok menerus menghasilkan gaya geser maksimum sebesar 1639,12 kN pada tumpuan tengah. Gaya geser pada balok menerus lebih besar dibanding pada balok sederhana.

2. Dengan menggunakan *PCI-Girder* pada jembatan bentang 30 m, desain balok menerus lebih hemat dibandingkan dengan balok sederhana dalam hal penggunaan material *strand*, tetapi lebih boros dalam penggunaan tulangan geser. Detail penggunaan material dapat dilihat pada poin-poin berikut.

a. *Strand*

Desain balok sederhana menggunakan *strand* sebanyak 56 buah, sedangkan desain balok menerus menggunakan *strand* sebanyak 52 buah. Terjadi penghematan penggunaan *strand* sebesar 7% pada desain balok menerus.

b. Tulangan geser

Desain balok sederhana menggunakan tulangan geser sebanyak 1060 buah, sedangkan desain balok menerus menggunakan *strand* sebanyak 1160 buah. Balok menerus menggunakan tulangan geser 9% lebih banyak dibanding desain balok sederhana.

6.2. Saran

Saran yang dapat diambil berdasarkan kesimpulan tersebut adalah sebagai berikut.

1. Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan dengan menggunakan penampang lain. Contoh, menggunakan *box girder*.
2. Perhitungan Rencana Anggaran Biaya (RAB) perlu dilakukan untuk mengetahui perbandingan biaya pelaksanaan pada desain balok prategang struktur balok sederhana dan balok menerus.

DAFTAR PUSTAKA

Darwis, Deddy. 2016. Perencanaan Ulang Jembatan Nambangan Bantul dengan Struktur I Girder Prestressed Concrete. *Tugas Akhir*. Universitas Islam Indonesia . Yogyakarta.

Direktorat Jendral Bina Marga. 2004. *Peraturan Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan RSNIT-12-2004*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

Direktorat Jendral Bina Marga. 2005. *Standar Pembebanan untuk Jembatan RSNIT-02-2005*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

Direktorat Jendral Bina Marga. 2016. *Pembebanan untuk Jembatan SNI-1725-2016*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

Direktorat Jendral Bina Marga. 2008. *Standar Perencanaan Gempa Untuk Jembatan SNI 2833-2008*. Badan Standarisasi Nasional. Jakarta.

Lin, T.Y. dan Burns N.H.. 2000a. *Desain Struktur Beton Prategang Jilid 1*. Binarupa Aksara. Jakarta.

Lin, T.Y dan Burns N.H.. 2000b. *Desain Struktur Beton Prategang Jilid 2*. Binarupa Aksara. Jakarta.

Nawy, E.G.. 2001. *Beton Prategang Suatu Pendekatan Mendasar jilid 1* . Erlangga. Jakarta.

Putra, B.P.. 2016a. Perencanaan Ulang Jembatan Jurang Gempal Menggunakan Struktur Beton Prategang Jenis Gelagar U . *Tugas Akhir* . Universitas Islam Indonesia . Yogyakarta.

Putra, Oscar W.D.. 2016b. Studi Perbandingan Perencanaan Ulang Struktur Atas Jembatan Jurang Gempal Menggunakan Prestressed Concrete Box Girder dan Prestressed Concrete I Girder. *Tugas Akhir* . Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Struyk, H.J. dan Veen D.V.. 1984. *Jembatan*. Jakarta: Pradnya Paramita.

Supriyadi, Bambang dan Muntohar A.S.. 2000. *Jembatan*. Beta Offset. Yogyakarta.

VSL (Vorspann System Losinger). 2018. *VSL Post Tensioning Solutions*. http://www.vsl.com/download.php?brochure_cat=post-tensioning-strand-systems&getfile=vsl-post-tensioning-solutions.pdf. Diakses pada 13 Maret 2018 (brosur).